

Toutes les RÉPONSES aux questions que vous vous posez, quels que soient votre NIVEAU, votre SPORT et vos OBJECTIFS

Didier REISS
D[r] Pascal PRÉVOST

Préface
Georges CAZORLA

La bible de la préparation physique

Le guide scientifique et pratique pour tous

e-@mphora

Didier REISS
Dr Pascal PRÉVOST

La bible de la préparation physique

Le guide scientifique et pratique pour tous



27, rue Saint-André des Arts - 75006 PARIS

Remerciements

Nous avons l'impression que les remerciements sont "obligatoires", que la courtoisie guide la plume (voire le clavier à notre époque). Or, c'est avec sincérité que nous allons faire les nôtres.

Merci à Alain Miskovic et à Christine Aubé, l'équipe d'AlphaStudio. Ils doivent être patients face aux lenteurs des auteurs. Grâce à eux, Pascal a pu retourner dans sa terre natale.

Merci à Renaud Dubois pour son idée initiale, sa confiance et son ouverture d'esprit sans lesquels nos "caprices" auraient été difficilement accueillis, notamment le doublement de l'épaisseur de l'ouvrage... pour assouvir notre soif d'écriture (même si nous n'avons pas abordé tous les sujets que nous souhaitions traiter).

Merci Sarah et Anne et à nos familles de nous avoir supportés (dans les deux sens du terme) et d'avoir accepté que nous consacrions du temps à l'écriture.

Merci à Benjamin et Valérie pour la mise à disposition de leur salle "Spirit of fitness" (Chambéry) pour les photos - www.spiritoffitness.fr

Une mention spéciale pour leur contribution lors de la relecture dont Delphine Dubois a assumé aussi une grande partie... il lui reste encore des cheveux... c'est l'essentiel.

Merci à Céline Prochasson pour sa contribution aux photos dans le chapitre 15.

Enfin, un très grand merci à toutes celles et ceux, sportives et sportifs de tous niveaux, qui nous ont fait confiance pendant toutes ces années. En faisant appel à nos services, ils ont montré qu'ils croyaient en nous, malgré l'utilisation de méthodes et d'outils qu'ils ont quelquefois trouvés "bizarres" ou "avant-gardistes" tant ils étaient surpris par rapport à ce qu'ils avaient rencontré habituellement dans les clubs (y compris les plus réputés) de leurs disciplines sportives.

"Et pourtant elle tourne !" avait dit Galilée en son temps face aux membres de l'inquisition qui remettaient en cause ses démonstrations des mouvements célestes. "Et pourtant ça marche" nous ont dit les athlètes après quelques semaines de travail en constatant leurs progrès.

C'est la plus belle récompense que nous ayons eue et la source de notre motivation à continuer dans cette voie.

Maquette : alphastudiocom.com
Illustration de couverture : ©Fotolia
Photos : les auteurs et alphastudiocom

Imprimé dans l'union européenne par Sagrafic
Plaza Urquinaona - 14, 7e, 3a - 08010 BARCELONA

ISBN : 978-2-85180-849-3

Sommaire



Préface
Toute vérité franchit trois étapes.
D'abord, elle est ridiculisée.
Ensuite, elle subit une forte opposition.
Puis, elle est considérée comme ayant été une évidence.
Arthur Schopenhauer (1788 - 1860)
7
Préambule
11
1
Introduction
19
2
Comment identifier ses besoins ?
33
3
Comment développer son endurance spécifique ?
65
4
Comment perdre du poids ?
195
5
Comment optimiser la musculation avec les bons mouvements ?
235
6
Comment développer sa force maximale ?
283
7
Comment développer sa force explosive ?
331



8 Comment développer sa vitesse ? 359

9 Comment développer sa masse musculaire ? 387

10 Comment développer sa souplesse ? 417

11 Comment développer son équilibre ? 485

12 Comment développer un gainage fonctionnel ? 527

13 Comment utiliser l'électrostimulation pour les différentes qualités physiques ? 553

14 Comment établir une planification ? 567

15 Comment récupérer ? 605

Hommage à la préparation physique et aux hommes d'exception 633



Préface

Toute vérité franchit trois étapes.
D'abord, elle est ridiculisée.
Ensuite, elle subit une forte opposition.
Puis, elle est considérée comme ayant été une évidence.

Arthur Schopenhauer (1788 - 1860)

Dans le cadre du très bref délai imposé pour réaliser cette préface, acceptée avec plaisir, je viens d'achever la lecture de cet impressionnant ouvrage. Je suis encore sous l'effet étrange d'avoir beaucoup appris en peu de temps... Il est évident qu'il me faudra revenir plus en détail sur chacun des quinze chapitres qui le constituent pour mieux apprécier leur très grande richesse respective.

Conjuguée à l'expérience de terrain, la culture scientifique de Didier REISS et de Pascal PRÉVOST me laisse très admiratif. Dans la stratégie dialectique choisie des constants allers et retours entre la forte expérience du terrain et leur éclairage scientifique fondamentalement appliqué, les auteurs placent la barre très haut parmi les autres ouvrages traitant de la préparation physique.

Ayant lu la plupart d'entre eux, particulièrement ceux qui me paraissaient les plus armés scientifiquement, sans hésitation je me permets de placer "La bible de la préparation physique" très nettement au-dessus des autres, place d'où il sera difficile de déloger cet ouvrage tant la documentation scientifique sur laquelle s'adossent les propositions pratiques de terrain est dense et pertinente (1 278 publications internationales exploitées !). Pourtant insatiables, les auteurs parlent déjà d'intégrer dans une future édition les nouvelles publications qui ne cessent de paraître !

Avant d'anticiper le futur arrêtons-nous déjà sur le présent.

Attention au titre... Bien que "la bible..." ait une acception bien admise pour signifier au lecteur intéressé qu'il pourra trouver tout ce qu'il recherche... ce concept supporte aussi des connotations religieuses... Peut-être conviendrait-il de trouver un titre plus consensuel pour signifier qu'ici rien n'est laissé dans l'ombre.

De prime abord, l'ordre des chapitres proposé par les auteurs peut paraître assez classique et correspondre aux capacités à développer pour

réaliser une performance dans certaines disciplines sportives comme la vitesse, la force, la puissance, la souplesse, les capacités aérobies et anaérobies alors que d'autres répondent davantage au développement ou au maintien d'un bon niveau de condition physique comme la capacité cardio-circulatoire, l'endurance musculaire, la souplesse à nouveau, l'équilibre et la composition corporelle... Pour ma part, j'aurais bien aimé voir apparaître aussi la coordination comme autre entité motrice...

Comme le souhaitent les auteurs, remarquons que certaines de ces capacités permettent à la fois la réalisation d'une performance et contribuent au maintien ou au développement d'un bon niveau de condition physique... tout dépend de leur niveau d'entraînement.

Enfin, comme tout acte moteur ou action motrice, même exprimés à leur plus haut niveau, ne sont que la résultante d'interactions multiples de diverses capacités, celles-ci peuvent-elles s'exprimer à leur maximum ou de façon relative ? Dans ce dernier cas le préparateur physique doit-il les entraîner pour les pousser dans leur extrémité ou rechercher leur optimum pour réaliser une tâche particulière ? Vaste débat...

Comparé aux autres ouvrages traitant du même sujet, ici s'arrête le classicisme précédemment évoqué. Aux antipodes de la doxa, étayées par les avancées de la connaissance, souvent les propositions des contenus d'entraînement sortent des sentiers battus. Nombre de lecteurs habitués au confort des idées reçues et longtemps acceptées risquent d'être bousculés, mais n'est-ce pas du chaos que naissent les plus grands progrès ?

Revers de cette médaille, comme la science ne cesse d'avancer, que seront demain nos certitudes d'aujourd'hui ? Oui, il est probable que d'autres éditions seront nécessaires pour poursuivre cet indispensable ajustement et cette dialectique terrain-science-terrain. Améliorer la performance du sportif sans nuire à la santé de l'Homme demeurera in fine la principale cible visée.

Dans cette perspective double, votre ouvrage est destiné à beaucoup apporter non seulement aux préparateurs physiques, mais aussi aux entraîneurs, aux médecins du sport, aux étudiants en STAPS... à leurs enseignants qui prendront, à ne pas en douter, autant de plaisir à vous lire que j'en ai eu moi-même.

Sachez Didier et Pascal, vous qui, il y a longtemps... avez été mes étudiants, que je suis très fier de la qualité de votre production, aussi, je ressens comme un cadeau et un grand honneur que vous me faites en me demandant de la préfacer.

À nouveau, mes plus vives félicitations !

Georges CAZORLA

Docteur en STAPS

Expert en physiologie et méthodologie de l'évaluation et de la détection

Créateur du diplôme d'université en évaluation et préparation physique

Préambule

> *"La structure d'une chose n'est nullement une chose que nous puissions "inventer". Nous pouvons seulement la mettre à jour patiemment, humblement en faire connaissance, la "découvrir". S'il y a inventivité dans ce travail, et s'il nous arrive de faire œuvre de forgeron ou d'infatigable bâtisseur, ce n'est nullement pour "façonner", ou pour "bâtir", des "structures". Celles-ci ne nous ont nullement attendus pour être, et pour être exactement ce qu'elles sont ! Mais c'est pour exprimer, le plus fidèlement que nous le pouvons, ces choses que nous sommes en train de découvrir et de sonder, et cette structure réticente à se livrer, que nous essayons à tâtons, et par un langage encore balbutiant peut-être, de cerner."*
>
> Alexandre Grothendieck,
> *Mathématicien. Récoltes et semailles*[1]

Curiosité

Lorsque nous nous sommes rencontrés il y a plus de 10 ans, rien ne laissait présager l'écriture à 4 mains d'une partition sur la préparation physique. Cependant, notre vécu sportif et scientifique aurait dû nous mettre la puce à l'oreille. Car telle est la chose qui nous a fait nous rencontrer.
Notre curiosité et notre liberté d'esprit nous ont rapprochés et nous ont amenés à travailler ensemble par la suite.
Ce que nous couchons aujourd'hui sur le papier est le fruit d'une expérience de 20 ans autant dans les pratiques sportives que dans le domaine des sciences biologiques appliquées.

Nous le faisons car nous partageons plusieurs choses :

- une volonté de comprendre tout ce qui a trait à la préparation physique en lien avec la performance et la santé de l'athlète ;
- une volonté de lutter contre la doxa très (trop) présente dans notre milieu, de combattre les idées reçues qui prévalent encore sur le terrain,

1 / Alexandre Grothendieck, Mathématicien. Récoltes et semailles, Montpellier, Université des Sciences et Technologies du Languedoc (1985), p. 27.
En savoir plus : http://images.math.cnrs.fr/Alexandre-Grothendieck.html

alors que des avancées scientifiques significatives ont souvent été réalisées tout en restant méconnues ;
- un attrait de longue date pour la vulgarisation scientifique, c'est-à-dire "le fait d'adapter un ensemble de connaissances techniques, scientifiques, de manière à les rendre accessibles à un lecteur non spécialiste[2]"..., mais la vulgarisation sans tomber dans le vulgaire, à savoir sans trop dénaturer les données qui nous semblent importantes et en perdre l'essence. Le corollaire est l'acceptation que la complexité est un aspect aujourd'hui incontournable de tout savoir car tel est le monde qui nous entoure.

Cela n'est pas sans poser quelques problèmes car l'innovation et la prospection ne sont pas forcément des terrains où les entraîneurs sont à l'aise car nous nous complaisons très (trop) souvent dans la routine des programmes que nous maîtrisons, sans imaginer un instant aller explorer de nouveaux pans de la physiologie de l'entraînement issus de travaux plus ou moins bien conçus et plus ou moins bien transférables sur le terrain. Et nous en parlons en connaissance de cause car nous avions cette attitude au début de notre carrière d'entraîneur.

À l'inverse, les questions de terrain arrivent souvent dans les laboratoires pour essayer de comprendre notre corps en action, lever le voile sur ses capacités d'adaptation quelquefois insoupçonnées et intrigantes, mais aussi mettre en évidence que nos concepts et notre vision sont erronés et qu'il est nécessaire de changer de point de vue pour passer à un nouveau stade de compréhension, plus proche de la réalité telle qu'elle se présente à nous.

Telle a été notre évolution, non sans heurts ou sans mal, non sans difficultés et interrogations, pour aujourd'hui arriver à ce que nous proposons comme accompagnement individualisé, quel que soit le niveau de pratique de la personne, surtout celle qui souhaite découvrir de nouvelles approches, dans l'entraînement physique notamment. À la façon de Grothendieck que nous avons cité en début de ce préambule, nous essayons,

2 / Le Robert de la langue française : dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française. Paris, Ed. Dictionnaires le Robert, 2004. p. 2812.

à notre humble niveau, de décrire le plus fidèlement possible les phénomènes qui se déroulent dans notre organisme lorsqu'il est soumis à une contrainte dont l'objectif est d'améliorer ou entretenir une qualité physique dans le respect de l'intégrité physique de la personne tous niveaux de pratique confondus.

Compréhension

Ainsi, nous souhaitons valoriser une ***pratique fondée sur des faits*** qui balaierait ainsi les nombreuses idées reçues qui circulent sur le terrain et dans les laboratoires ; celles qui ont la vie dure. Il est un temps où le débat est important pour confronter les opinions, pour essayer de comprendre, pour mettre en relation les faits et les différentes théories. Trop souvent, des raccourcis se font entre une conviction (individu) ou une opinion (groupe) et un fait scientifique. Le même problème se pose entre les faits et la théorie. Ce sont deux choses différentes. Cela peut paraître abstrait dit comme ça, pourtant tous les freins, toutes les approximations, toutes les mauvaises interprétations viennent d'abord de ces amalgames.

Mais une pratique fondée sur des faits n'est en rien une pratique figée… bien au contraire. N'étant pas enfermée dans un cadre théorique rigide, elle peut se permettre d'aller explorer à droite à gauche de nouvelles façons de faire, d'essayer de nouveaux exercices quitte à se tromper, de mettre en place de nouvelles formes d'ateliers quitte à les abandonner par la suite si les résultats ne sont pas concluants.

Donnons deux exemples pour bien comprendre notre point de vue. Pour cela, nous allons faire parler deux éminents chercheurs que nous apprécions tant pour la qualité de leur vulgarisation scientifique que pour leur accessibilité lorsque nous les avons rencontrés à plusieurs reprises pour parler de leur spécialité. Aussi étrange que cela puisse paraître, ils ne sont pas issus des sciences biologiques appliquées au sport et à l'exercice physique. Eh oui ! Il y a une vie en dehors du sport !

Le premier, Stephen J. Gould (paléontologue américain décédé en mai 2002), a écrit à propos de l'évolution[3] ce qui suit en 1994[4] :

> *"Eh bien, l'évolution est une théorie. C'est également un fait. Et les faits et les théories sont des choses différentes, non des échelons dans la hiérarchie de certitude croissante. Les faits sont les données du monde. Les théories sont des structures d'idées qui expliquent et interprètent les faits. Les faits ne disparaissent pas quand des théories scientifiques rivales débattent pour les expliquer. La théorie de la gravitation d'Einstein a remplacé celle de Newton, mais les pommes ne se suspendent pas en l'air en attendant le résultat. Et l'homme a évolué à partir d'ancêtres simiesques, qu'il l'ai fait par le mécanisme proposé de Darwin ou par un autre, encore à découvrir.*
> *Par ailleurs, "fait" ne signifie pas "certitude absolue". Les preuves finales de la logique et des mathématiques découlent de façon déductive à partir de prémisses déclarées et atteignent la certitude que parce qu'ils ne sont pas sur le monde empirique. [...] En science, "fait" signifie seulement "confirmé à un degré tel qu'il serait pervers de refuser la correction provisoire." Je suppose que les pommes pourraient commencer à s'élever demain, mais la possibilité ne mérite pas qu'on lui accorde le même temps dans les salles de classe physique."*

Le second est Hubert Reeves (astrophysicien), dont nous rapportons les propos tenus lors d'une émission radiophonique diffusée en 2012[5] :

> *"Nous ne savons pas plus qu'il y a 50 ans si nous sommes seuls dans l'univers ou non. Sur le plan de la science nous n'avons pas de réponse, c'est peut-être oui, peut-être non. Sur le plan des opinions, j'ai une conviction intime [...] que la vie sur d'autres planètes habitées, avec des gens qui font de la science est*

3 / SJ Gould, Hen's Teeth and Horse's Toes, 1994, pp. 253-254.
Un extrait est disponible sur le lien suivant
http://www.stephenjaygould.org/library/gould_fact-and-theory.html.

4 / Nous avons souligné les passages qui nous semblent importants.

5 / France Inter dans le Journal 7/9. Interrogé par Laurence Luret le dimanche 23/12/2012 à 8h16 pendant la chronique « Parenthèse ».

un phénomène cosmique très général. Mais je ne peux pas l'affirmer au nom de la science ; je ne peux l'affirmer qu'au nom de l'opinion. Et j'ai des collègues qui croient le contraire, et c'est très bien. Nous pouvons en débattre indéfiniment."

À elles deux, ces citations résument parfaitement notre démarche. Certes il y a des théories qui s'affrontent pour expliquer tel ou tel fait observé et mesuré sur le terrain, mais il n'en reste pas moins que certaines marchent sans qu'on puisse les expliquer aujourd'hui. Et c'est ça le plus important. Il n'est nul besoin d'attendre que l'on ait l'explication à partir de nos connaissances actuelles pour aller de l'avant car l'évolution des savoirs pourra faire évoluer cette explication dans une direction qui la renforce ou la réfute. Nul ne le sait. En revanche, il n'est plus concevable, à une époque où l'information est accessible quasiment en temps réel, de continuer à s'appuyer sur des théories ou méthodes contre lesquelles on dispose de suffisamment de preuves pour dire qu'elles sont obsolètes et que l'on peut faire mieux aujourd'hui.

Partage

Il est également un temps, tout aussi important, pour transmettre l'état des connaissances actuelles sur un sujet donné afin de rendre compte de l'avancement, de l'évolution des savoirs à notre disposition. Ces deux phases sont indispensables, complémentaires et incontournables dans la construction des méthodes et outils nécessaires à l'entraînement et la préparation physique. Il en va de notre ***crédibilité*** en tant qu'***experts du mouvement***, tant auprès des athlètes que du grand public.

Reste donc le problème de la transmission des connaissances qui peuvent être appliquées à une pratique professionnelle. Le mouvement, c'est le mouvement. Les fondamentaux restent les mêmes quel que soit le contexte, ce qui fait de la préparation physique une sorte de champ transdisciplinaire, une approche plurielle pour une réponse individuelle (cf.

Chapitre 2 Identifier ses besoins). Cette approche nous a amené à nous intéresser à différents domaines pour avoir une vision plus globale des phénomènes observés et ainsi mieux comprendre les processus mis en jeu face au stress qu'induit un programme d'entraînement, stress tel que décrit par Selye [6], à savoir une "adaptation".

Certes, un ouvrage reste un savoir figé, une photographie des connaissances du moment. Mais il peut être intéressant de l'écrire ne serait-ce que pour apporter des éclairages aussi instructifs (compréhension) que nécessaires (utilité). Une ancienne ministre de la Recherche, seule femme astronaute française, n'a-t-elle pas dit si justement : "Un savoir ne vaut que s'il est appliqué" ? Savoir, c'est bien... Le mettre en pratique, c'est mieux, mais pas forcément évident.

Nous espérons que ce moment de partage éveillera votre curiosité et vous apportera autant de plaisir qu'il nous en a procuré et continue à le faire dans notre quotidien, en tant que préparateur physique, formateur, conférencier... en France comme ailleurs.

6 / Le Stress de la vie. Paris : Ed. Gallimard, Collection Les Essais (n° 192). 2e éd., 1975, 464 pages.



1

Introduction

"Avec Darwin, les variations sont la réalité, et la moyenne calculée une abstraction mentale. Sous Platon, les variations étaient accidentelles tandis que l'essence représentait la réalité. Nous vénérons la distribution normale parce que nous avons tendance à croire à des valeurs idéalisées accompagnées à leurs côtés de variations dues au hasard. Mais la nature correspond rarement à nos attentes."

S.J. Gould, Life's Grandeur :
The Spread of Excellence from Platon to Darwin, 1996

On ne peut plus envisager aujourd'hui de parler de performance sportive sans évoquer la préparation physique qui lui est associée. Elle en est même devenue indissociable, qu'elle soit gérée par l'entraîneur lui-même (faute de moyen ou par plaisir) ou par un préparateur à part entière.

Même si elle existe depuis bien longtemps (regardez par exemple les textes évoquant la façon dont les gladiateurs ou les athlètes se préparaient avant les olympiades modernes), elle a vraiment pris son essor dans la continuité du développement des sciences biologiques et physiques appliquées à l'exercice physique et au sport ; en particulier lorsque des chercheurs ont commencé à s'intéresser aux capacités physiques dans le cadre de la performance pure et dure (notamment avec des militaires), aux processus d'adaptation, à leur amélioration ou leur maintien.

En 20 ans de pratique, nous avons constaté plusieurs évolutions qui ont fait de notre métier non seulement quelque chose de plus riche mais aussi de plus difficile à gérer. Cette évolution tient en 3 mots : transversalité, complexité et spécificité.

1 • Transversalité

En effet, au fil des ans, nous nous sommes aperçus que beaucoup avaient souvent vulgarisé des notions en en dénaturant l'essence même, biaisant ainsi l'idée que l'on se faisait de telle ou telle capacité physique, de telle ou telle réaction physiologique ou de telle ou telle adaptation à l'entraînement. Idem pour d'autres qui ont interprété ou fait dire à des chercheurs ce qu'ils n'avaient jamais dit.

En allant voir ce que faisaient d'autres entraîneurs dans d'autres disciplines (il n'y avait pas encore de préparateurs physiques en tant que tel à l'époque), nous avons découvert d'autres façon de faire, d'autres façons d'aborder telle ou telle difficulté. Nous avons pu ainsi avoir un angle d'approche différent et enrichissant de nos propres problèmes.

La suite a été logique : nous avons voulu en savoir plus et sommes allés lire de plus en plus d' ouvrages, puis de plus en plus de publications pour avoir un éclairage à deux niveaux, comme la vision des faucons : à la fois fine et panoramique.

D'où notre approche fondée sur un ***triptyque*** qui, au fur et à mesure des années, nous a semblé évidente, logique et incontournable, tant par notre vécu compétitif que notre expérience de formateur et chercheur. Pourquoi trois ? Prenez une chaise dont l'un des pieds est un peu plus court que les autres... vous ne pourrez la stabiliser car elle restera bancale et ne pourrez donc maintenir votre équilibre qu'au prix d'un effort. Maintenant prenez un tabouret à 3 pieds. Même si l'un d'eux est plus court, vous pourrez être en équilibre malgré une stabilité moindre du fait de l'inclinaison de l'assise. Donc même en ayant un pied plus court, on pourra rester assis... tant qu'il n'est pas trop court évidemment.

C'est la même chose avec notre triptyque : on peut négliger l'un des aspects. Mais à partir d'un certain manque, on ne peut plus se maintenir et c'est la chute. Cette approche est illustrée par la Figure 1 qui démontre

que l'on ne peut envisager d'atteindre une performance, quel qu'en soit le niveau, sans investir dans 3 piliers.

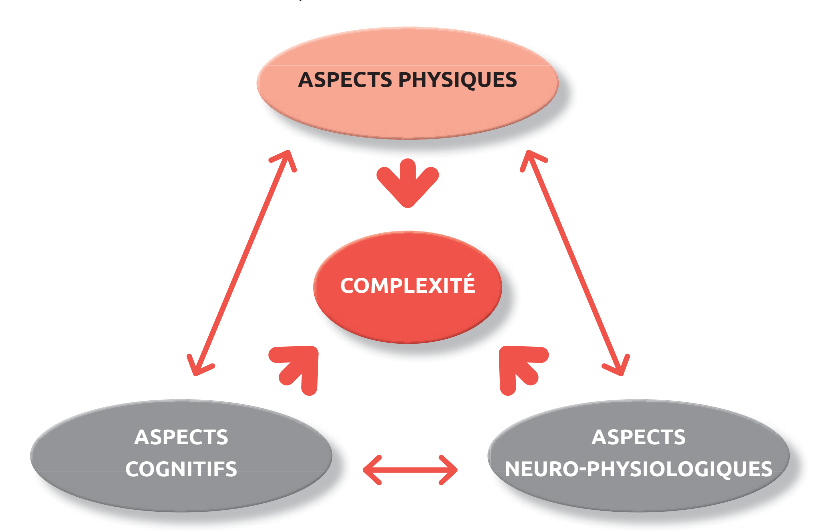


Figure 1 : Les trois piliers de la performance. La complexité est aussi de la partie car elle est au cœur de tout processus d'accompagnement individualisé.

- l'aspect ***physique*** : concerne tous les points ayant un lien avec les capacités physiques liées à la performance ;
- l'aspect ***neurophysiologique*** : regroupe tous les éléments touchant la récupération, la nutrition, etc. ;
- l'aspect ***cognitif*** : s'intéresse tout particulièrement au côté "cérébral" de l'accompagnement de l'athlète dans sa gestion du stress, de sa capacité de prise de recul, d'anticipation des enjeux compétitifs, de projection dans une carrière, tout ça en lien avec ses traits de caractère et son profil de motivation intrinsèque.

C'est surtout sur le premier point que nous allons nous attarder dans cet ouvrage, même si nous ferons appel à certains travaux ou notions issus des deux autres champs pour étoffer notre argumentation et donner des exemples de retour de nos expériences sur le terrain.

2 • Complexité

Pourquoi mettre la complexité au centre de ce triptyque ? (Figure 1)
On sait aujourd'hui qu'elle est au cœur du tout processus biologique et physique. On ne peut donc l'occulter dès lors qu'on s'engage dans un processus d'accompagnement individualisé.
Elle est même un aspect qui va nous donner la possibilité de trouver des solutions là où nous n'en aurions pas trouvées en gardant une vision "classique" dans notre approche. Nous y ferons référence quand cela sera nécessaire en citant des publications représentatives de cet aspect de notre travail ou en évoquant certains moments de la pratique de terrain qui le reflètent à leur façon.
Selon nous, celui qui en a le mieux parlé est Edgard Morin, dans son ouvrage "Introduction à la pensée complexe[7]".
L'adopter c'est être animé "par une tension permanente entre l'aspiration à un savoir non parcellaire, non cloisonné, non réducteur, et la reconnaissance de l'inachèvement et de l'incomplétude de toute connaissance".

Une autre raison est que nous sommes des gens d'action. Tous les jours, sur le terrain, nous devons faire des choix, prendre des décisions. Mais choisir, c'est éliminer des possibles, c'est faire un pari sur l'avenir. Aussi nous essayons d'avoir le maximum d'informations pour limiter les risques, limiter l'incertitude et augmenter nos chances d'atteindre nos objectifs en nous engageant dans le scénario qui nous semble le plus probable, le plus réaliste, le plus atteignable. C'est tout cela que montrent aujourd'hui les neurosciences et que nous avons également montré dans nos propres travaux : notre cerveau a un fonctionnement probabiliste, il pèse le pour et le contre, évalue, anticipe, fait des plans sur l'avenir à partir des informations dont il dispose. C'est pour cela que plus on dispose d'informations, plus il est *a priori* facile de prendre une décision et de voir nos chances de réussite augmenter.

7 / Edgard Morin, Introduction à la pensée complexe. Paris : Gallimard, 2e éd., 2005.

Le souci est quand nous avons peu ou pas d'informations ou que nous pensons que celles que nous avons déjà rencontrées par le passé suffiront à avancer. L'expérience peut aider mais elle a ses limites. Gardez à l'esprit le fait que toute action doit intégrer la "complexité, c'est-à-dire aléa, hasard, initiative, décision, conscience des dérives et des transformations"[8].

Pour cette raison, nous devrions remplacer le mot de programme par celui de **stratégie**. Imaginer que l'on peut programmer d'une seule traite une année de préparation physique sans faire un seul changement est illusoire. Nous aimons commencer nos cours sur la "programmation "par la phrase suivante : *"le meilleur outil pour faire un programme d'entraînement, c'est la gomme".* Nous sommes d'accord, à l'ère de l'informatique, parler de gomme, c'est un peu dépassé. Mais l'idée est là. Tout bouge, tout change, tout vacille en permanence. Nous devons tout le temps nous ajuster, tenter de nouvelles choses si cela est nécessaire. Même si cela se fait dans un cadre d'intervention défini à l'avance, il peut être intéressant de sortir de ce cadre, justement pour découvrir une solution inattendue. Donc tant que tout roule, on est dans le programme, mais dès que les choses se corsent, on entre dans la stratégie. Apprendre à faire le va-et-vient entre les deux est primordial aujourd'hui si l'on souhaite aborder l'humain dans toute sa complexité.

Nous avons fait nôtres les mots d'Edgard Morin : *"N'oublie pas que la réalité est changeante, n'oublie pas que du nouveau peut surgir et, de toute façon, va surgir"*[9]. C'est aussi pour cette raison que nous nous sommes lancés dans la rédaction de cet ouvrage, avec pour objectif de vous donner un maximum d'informations, non pour fournir des recettes, mais plutôt pour vous aider dans vos propres décisions, dans vos propres choix, dans vos stratégies d'amélioration des performances des personnes qui vous ont fait confiance. Muter de la rationalisation à la rationalité, tel est notre défi d'aujourd'hui. La première nous enferme dans un système qui se veut

8 / E. Morin, op.cib., p. 107

9 / E Morin, op. cib., p. 111

cohérent, mais qui écarte tout ce qui pourrait le contredire. La seconde, au contraire, accepte l'incertitude lorsque la réalité n'est plus en accord avec son modèle de pensée, quitte à revoir sa copie.

3 • Spécificité

En introduisant le concept d'homéostasie complété par Walter B. Cannon[10], Claude Bernard[11] a, sans le savoir (ou presque), posé les bases de ce qui allait être le soubassement de toute approche s'intéressant aux changements d'état du corps suite à l'application d'un "stresseur" tel que l'activité physique.

L'ossature de nos raisonnements s'articule autour :

1 • de l'identification des mécanismes en jeu dans le maintien d'une fonction ou d'une qualité physique ;
2 • de la compréhension des processus à l'origine de telle ou telle adaptation permettant de se retrouver dans un nouvel état plus ou moins stable, et plus ou moins bien adapté à la contrainte imposée ;
3 • de la description de ce qui pourrait être considéré comme les bons outils et/ou méthodes, c'est-à-dire ceux qui sont les plus à même de nous permettre d'atteindre ces états optimaux où l'organisme est capable de faire face aux contraintes sans être forcément dans l'épuisement systématique.

C'est cette gymnastique permanente que nous devons pratiquer pour être en mesure de faire des propositions qui s'avèreront efficaces (atteinte de l'objectif souhaité) ou mieux, efficientes (atteinte de l'objectif avec un minimum de ressources et/ou une gestion intelligente des ressources).

10 / Walter Bradford Cannon, The Wisdom of the Body, 1932.

11 / Claude Bernard, Introduction à l'étude de la médecine expérimentale, 1865.

La bonne dose au bon moment

Citons pour seul exemple la comparaison des méthodes d'entraînement. Si l'on veut savoir ce qui fonctionne le mieux, il convient de tout prendre en considération, sinon on peut aboutir à une conclusion qui n'est pas supportée par les études publiées en règle générale. C'est le cas de la polémique qui dure depuis plus de 15 ans sur la comparaison entre entraînement en série unique ou série multiple. En 1925, Earle Liederman[12](19) proposa l'idée selon laquelle il existerait un seuil d'intensité permettant d'obtenir l'effet désiré, à savoir l'augmentation de la masse et de la force musculaire.

Depuis ces idées séminales, nombreuses sont les publications qui ont analysé les effets de différentes charges de travail. Ce n'est que récemment que la question d'une intensité nécessaire et suffisante a été remise au goût du jour. L'article de Carpinelli et Otto (7) a jeté un pavé dans la mare des méthodes d'entraînement en renforcement musculaire, secteur longtemps resté sous la prédominance des séries multiples sur les séries uniques en termes d'efficacité. Nous explorerons d'autres aspects tout aussi intéressants dans cet ouvrage.

Cela pose le problème de la dose optimale d'entraînement à utiliser avec une personne. Or, il convient d'être très prudent dans l'utilisation de ce terme car ce qui semble être optimal d'un point de vue statistique avec la valeur moyenne, ne l'est plus dès que l'on s'intéresse à l'effet de l'entraînement chez un sujet donné.

C'est ce qu'essaient de faire comprendre depuis de nombreuses années certains chercheurs et auteurs dont nous faisons partie. Nous en voulons pour exemple les propos récemment tenus par Fisher (8) au sujet de la polémique des séries en musculation.

12 / L'ouvrage a été récemment réédité par Triarius Publishing (2008) mais une version originale électronique est disponible via ce lien : http://www.sandowplus.co.uk/Competition/Liederman/SecretsofStrength/sos-intro.htm

"En fin de compte, alors que l'article publié par Krieger (18), essayant de résumer un domaine aussi complexe, est très important, les physiologistes de l'exercice devraient veiller à ne pas devenir si accablés par une analyse quantitative qu'ils perdent de vue de la pratique et des réalités de l'entraînement en force. Les futurs chercheurs pourraient soutenir que l'entraînement en série multiple est plus bénéfique que l'entraînement en série unique pour l'hypertrophie musculaire.
En attendant, la méta-analyse de Krieger qui compare une telle complexité des participants, des méthodes d'entraînement et des mesures d'hypertrophie est contestée par les limitations qui retardent voire empêchent les physiologistes de l'exercice de soutenir une telle conclusion simple. "(8).

Prudence dans l'application des résultats de certaines études car les statistiques ne donnent pas forcément les réponses que l'on attend et gomment souvent les différences interindividuelles qui pourraient nous rendre bien des services. En 1954, un écrivain américain, Darell Huff, publiait un ouvrage au nom évocateur "How to lie with statistics", "comment mentir avec les statistiques". Mais dès 1906, Mark Twain, dans son livre "Chapters from My Autobiography" disait déjà qu'il y a 3 types de mensonges : les mensonges, les sacrés mensonges et les statistiques. Faire le lien avec la réalité du terrain, prendre en considération les diverses réactions des sujets face à un programme individualisé, est donc tout aussi important.

De l'importance de l'individualisation

Nous en arrivons à la raison de cet ouvrage, car s'il n'y en avait qu'une seule à citer, ce serait celle-là : l'individualisation.

Pour bien en comprendre l'enjeu, nous reprendrons la démonstration du Pr Jean-Marc TRELUYER (Hôpital Necker, Paris ; http://www.rechercheclinique pariscentre.fr/?page_id=932) concernant la modélisation des effets d'un médicament (le lopinavir-ritonavir) utilisé pour prévenir la reproduction du virus de l'immunodéficience humaine chez des enfants. En partant des données d'une étude mesurant l'effet de ce médicament (9), il

reprend le volume de distribution et la clairance[13] exprimés par rapport au poids des enfants (Figure 2).

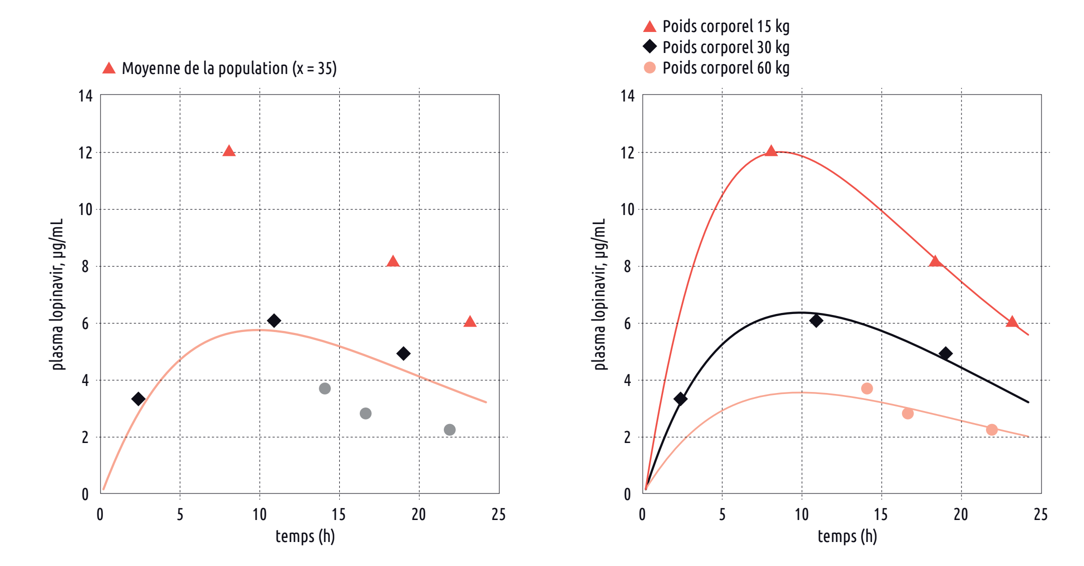


Figure 2 : Modélisation de l'action du lopinavir en prenant ou non en considération le poids du sujet (9). En A, valeurs avec courbe moyenne. En B, courbes individuelles en fonction du poids.

L'inclusion de la variable "poids de l'individu" change complètement la vision de l'impact du médicament en fonction du poids de l'enfant et ouvre la voie vers une individualisation plus poussée et plus efficace du traitement. ***C'est une démarche similaire que nous devrions adopter dans notre propre façon de mesurer et d'interpréter nos résultats de suivi d'entraînement ou de préparation d'un programme.***
Dans une approche optimisée de la performance, de quelque niveau que ce soit, il n'est pas (plus) souhaitable de s'appuyer uniquement sur des mesures de tendance centrale ou les variables associés à celles-ci (moyennes et écarts types par exemple) pour décrire les résultats sur lesquels établir des recommandations.

13 / Capacité d'un tissu, organe ou organisme à éliminer d'un fluide (le sang, la lymphe, etc.) une substance donnée, c'est en quelque sorte un coefficient d'épuration.

Au-delà des statistiques, il y a l'individu avec son potentiel, son histoire, son capital génétique, ses motivations,... autant de facteurs qui ont longtemps été laissés de côté ou tout simplement oubliés dans les formations d'entraîneurs et de préparateurs physiques (mais d'autres domaines ne sont pas en reste par rapport à nous, loin de là !)... jusqu'à ce que la réalité du terrain nous rappelle leur importance dans un suivi individualisé.
Nous l'évoquerons dans le chapitre sur l'identification des besoins, mais nous souhaitons le mentionner ici. C'est grâce à l'observation de ce qui se passe sur le terrain, de la mesure de variations interindividuelles, de la quantification des besoins à certains postes occupés dans une équipe de sport collectif par exemple, que la lumière s'est faite progressivement sur l'importance de l'individualisation des méthodes d'entraînement. Quand Bangsbo et coll. (1), Mohr et coll. (23) ou nos propres travaux chez les footballeurs professionnels de ligue 1 ou les rugbymen de l'équipe de France entre 1990 et 1992, mettent en évidence que les profils physiologiques et les contraintes imposées lors d'un match aux joueurs changent d'un poste à l'autre. Il devient alors évident qu'il faut prendre en considération des paramètres supplémentaires et être attentif aux besoins réels de l'athlète.
À cela s'ajoute deux facteurs qui devraient modifier profondément notre façon de voir les choses (si ce n'est pas déjà fait) et améliorer notre optimisation des charges de travail :

1 • **Tous les résultats issus des travaux relatifs aux différences interindividuelles à un même entraînement mais aussi d'un même individu à différents moments de la saison.** Les avancées réalisées dans les méthodes de séquençage et d'analyse de l'ADN y sont pour beaucoup. De là est apparue la notion de "répondeur" et "non répondeur" à une charge de travail donnée. L'idée que les variations de phénotypes[14] sous l'influence d'un entraînement pouvaient être très différentes d'un individu à l'autre, a permis de montrer que certains gènes étaient facilitateurs dans une forme d'adaptation plutôt qu'une autre (4, 6, 12-17, 20, 21, 24, 28-30).

14 / Ensemble des traits ou caractéristiques observables d'un individu correspondant à l'expression des gènes (génotype) sous l'effet de contraintes internes et/ou externes.

2 • **L’émergence d’outils de "profiling", grâce notamment aux neurosciences cognitives et à la psychosociologie.** Ces outils permettent de mettre en évidence tant les motivations intrinsèques pour trouver les bons leviers afin d’atteindre une performance donnée, que des préférences motrices qui orientent les exercices vers les points forts de l’athlète. On ne cherche plus à améliorer ses points faibles pour progresser plus rapidement car s'appuyer sur ses points forts est plus productif. (NPM©, Bio-Type©, ActionType©, etc.)(10, 11, 22, 25)

L’ensemble de ces données permet de comprendre qu’une personne réponde à une forme d’entraînement et pas une autre pour un paramètre spécifique d’une qualité physique, et que cela puisse être l’inverse pour un autre paramètre de cette même qualité physique (2, 3, 5, 27). D’où l’importance de changer de forme de travail jusqu’à ce que l’on trouve celle qui convient à tel ou tel individu. La contrepartie de ces découvertes est que l’individualisation est incontournable et nous oblige à fournir un travail supplémentaire pour explorer le champ des possibilités les plus à même de répondre aux besoins de l’athlète (16, 17, 26, 30).

4 • Organisation de l’ouvrage

Nous avons souhaité rendre fluide la lecture de cet ouvrage pour celles et ceux qui n’auraient pas l’habitude de lire des écrits à caractère scientifique. Ainsi, nous avons préféré mettre en fin de chapitre l’ensemble des articles scientifiques ayant été utilisés pour chacune des parties. Ces renvois correspondent aux nombres entre parenthèses dans le texte. Les notes de bas de page se feront par un nombre en exposant.

Lors de la rédaction de ce livre, nous avons essayé d’organiser les informations comme suit, dans la mesure du possible, en fonction des chapitres.

Objectif

Regrouper dans un premier temps les dernières avancées scientifiques et pratiques sur l'optimisation de la préparation physique sportive. Pour faciliter leur lecture, les chapitres ont été traités de façon indépendante et peuvent donc se lire dans le désordre si le lecteur le désire.

Cependant, certaines notions sont communes à plusieurs chapitres. Leur lecture conjointe pourra apporter des informations complémentaires et mieux éclairer les aspects de la préparation physique que nous traiterons dans cet ouvrage.

Méthode

Les points abordés sont documentés et illustrés de façon à faire comprendre les principes permettant d'atteindre les objectifs souhaités en toute sécurité et avec une efficacité avérée. Cependant, les différences interindividuelles peuvent changer un peu la donne et avoir un effet inattendu sur les performances souhaitées. Des exemples seront donnés pour illustrer ce paramètre fondamental pour les différentes qualités physiques.

Individualisation

Dans chacun des chapitres sont inclues les connaissances actuelles sur la thématique abordée et les données pratiques qui en résultent. Pour les aspects de terrain, quand cela est possible, des exemples sont donnés pour 3 niveaux : le débutant dans le domaine, l'entraîné, et enfin le sportif qui cherche une aide supplémentaire, mais qui ne veut pas faire de la qualité physique concernée son activité principale.

IMPORTANT

L'utilisation des données contenues dans cet ouvrage se fait sous l'entière responsabilité du lecteur. En aucun cas, les auteurs ne sauraient être tenus responsables des éventuelles erreurs ou dommages liés à l'utilisation des informations publiées dans cet ouvrage.

Bibliographie

• 1 • Bangsbo J, Norregaard L, and Thorso F. Activity profile of competition soccer. Canadian journal of sport sciences = Journal canadien des sciences du sport 16: 110-116, 1991.

• 2 • Bouchard C. Individual differences in the response to regular exercise. Int J Obes Relat Metab Disord 19 Suppl 4: S5-8, 1995.

• 3 • Bouchard C, An P, Rice T, Skinner JS, Wilmore JH, Gagnon J, Perusse L, Leon AS, and Rao DC. Familial aggregation of VO(2max) response to exercise training: results from the HERITAGE Family Study. J Appl Physiol 87: 1003-1008, 1999.

• 4 • Bouchard C, Boulay MR, Simoneau JA, Lortie G, and Perusse L. Heredity and trainability of aerobic and anaerobic performances. An update. Sports Med 5: 69-73, 1988.

• 5 • Bouchard C and Rankinen T. Individual differences in response to regular physical activity. Med Sci Sports Exerc 33: S446-451; discussion S452-443, 2001.

• 6 • Bouchard C, Tremblay A, Nadeau A, Despres JP, Theriault G, Boulay MR, Lortie G, Leblanc C, and Fournier G. Genetic effect in resting and exercise metabolic rates. Metabolism 38: 364-370, 1989.

• 7 • Carpinelli RN and Otto RM. Strength training. Single versus multiple sets. Sports Med 26: 73-84, 1998.

• 8 • Fisher J. Beware the Meta-Analysis: Is Multiple Set Training Really Better than Single Set Training for Muscle Hypertrophy? J Exerc Physiol (on line) 15: 7, 2012.

• 9 • Foissac F, Urien S, Hirt D, Frange P, Chaix ML, Treluyer JM, and Blanche S. Pharmacokinetics and virological efficacy after switch to once-daily lopinavir-ritonavir in treatment-experienced HIV-1-infected children. Antimicrobial agents and chemotherapy 55: 4320-4325, 2011.

• 10 • Fradin J, Aalberse M, Gaspar L, Lefrançois C, and Le Moullec F. L'Intelligence du stress Paris: Eyrolles, 2008.

• 11 • Fradin J and Le Moullec F. Manager selon les personnalités : les neurosciences au secours de la motivation. Paris: Eyrolles, 2007.

• 12 • Gaskill SE, Rice T, Bouchard C, Gagnon J, Rao DC, Skinner JS, Wilmore JH, and Leon AS. Familial resemblance in ventilatory threshold: the HERITAGE Family Study. Med Sci Sports Exerc 33: 1832-1840, 2001.

• 13 • Gaskill SE, Serfass RC, Bacharach DW, and Kelly JM. Responses to training in cross-country skiers. Med Sci Sports Exerc 31: 1211-1217, 1999.

• 14 • Gaskill SE, Walker AJ, Serfass RA, Bouchard C, Gagnon J, Rao DC, Skinner JS, Wilmore JH, and Leon AS. Changes in ventilatory threshold with exercise training in a sedentary population: the HERITAGE Family Study. Int J Sports Med 22: 586-592, 2001.

• 15 • Hamel P, Simoneau JA, Lortie G, Boulay MR, and Bouchard C. Heredity and muscle adaptation to endurance training. Med Sci Sports Exerc 18: 690-696, 1986.

• 16 • Keller P, Vollaard N, Babraj J, Ball D, Sewell DA, and Timmons JA. Using systems biology to define the essential biological networks responsible for adaptation to endurance exercise training. Biochemical Society transactions 35: 1306-1309, 2007.

• 17 • Keller P, Vollaard NB, Gustafsson T, Gallagher IJ, Sundberg CJ, Rankinen T, Britton SL, Bouchard C, Koch LG, and Timmons JA. A transcriptional map of the impact of endurance exercise training on skeletal muscle phenotype. J Appl Physiol 110: 46-59, 2011.

• 18 • Krieger JW. Single vs. multiple sets of resistance exercise for muscle hypertrophy: a meta-analysis. J Strength Cond Res 24: 1150-1159, 2010.

• 19 • Liederman E. Secret of Strength. New York, 1925.

• 20 • Lortie G, Bouchard C, Leblanc C, Tremblay A, Simoneau JA, Theriault G, and Savoie JP. Familial similarity in aerobic power. Human biology 54: 801-812, 1982.

• 21 • Lortie G, Simoneau JA, Hamel P, Boulay MR, and Bouchard C. Relationships between skeletal muscle characteristics and aerobic performance in sedentary and active subjects. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 54: 471-475, 1985.

• 22 • Maire G. Profilage moteur et qualités physiques du footballeur. Besançon, 2012, p 55.

• 23 • Mohr M, Krustrup P, and Bangsbo J. Match performance of high-standard soccer players with special reference to development of fatigue. J Sports Sci 21: 519-528, 2003.

• 24 • Perusse L, Lortie G, Leblanc C, Tremblay A, Theriault G, and Bouchard C. Genetic and environmental sources of variation in physical fitness. Annals of human biology 14: 425-434, 1987.

• 25 • Pink DH. Drive: The surprising truth about what motivates us. New York: Riverhead Books, 2009.

• 26 • Prud'homme D, Bouchard C, Leblanc C, Landry F, and Fontaine E. Sensitivity of maximal aerobic power to training is genotype-dependent. Med Sci Sports Exerc 16: 489-493, 1984.

• 27 • Simoneau JA, Lortie G, Boulay MR, Marcotte M, Thibault MC, and Bouchard C. Inheritance of human skeletal muscle and anaerobic capacity adaptation to high-intensity intermittent training. Int J Sports Med 7: 167-171, 1986.

• 28 • Skinner JS, Gaskill SE, Rankinen T, Leon AS, Rao DC, Wilmore JH, and Bouchard C. Heart rate versus % $\dot{V}O_2$max: age, sex, race, initial fitness, and training response--HERITAGE. Med Sci Sports Exerc 35: 1908-1913, 2003.

• 29 • Timmons JA, Knudsen S, Rankinen T, Koch LG, Sarzynski M, Jensen T, Keller P, Scheele C, Vollaard NB, Nielsen S, Akerstrom T, MacDougald OA, Jansson E, Greenhaff PL, Tarnopolsky MA, van Loon LJ, Pedersen BK, Sundberg CJ, Wahlestedt C, Britton SL, and Bouchard C. Using molecular classification to predict gains in maximal aerobic capacity following endurance exercise training in humans. J Appl Physiol 108: 1487-1496, 2010.

• 30 • Vollaard NB, Constantin-Teodosiu D, Fredriksson K, Rooyackers O, Jansson E, Greenhaff PL, Timmons JA, and Sundberg CJ. Systematic analysis of adaptations in aerobic capacity and submaximal energy metabolism provides a unique insight into determinants of human aerobic performance. J Appl Physiol 106: 1479-1486, 2009.

2

Comment identifier ses besoins ?

Sommaire

1 • Notion d'évaluation **35**
Qu'est-ce qu'évaluer ? 35
Pourquoi évaluer ? 36
Illustration de la variabilité biologique 38

2 • Notion de test physique **40**
Qu'appelle-t-on un test ? 40
Les quatre caractéristiques d'un bon test 40

3 • Notion de profil des qualités physiques **46**
Les principales composantes physiques de la performance 46
L'utilité du profil 47
Autre aspect du suivi individuel 48

4 • La mise en place d'un processus d'évaluation **49**
Importance du choix des tests 52
Importance de l'ordre des tests 52
Exemple pour la composition corporelle 53

5 • Conditions de réalisation d'un test **55**
Potentialisation post-activation 55
La vitesse de mouvement 56
La connaissance préalable du test 57
Le niveau d'engagement dans le test 59
Le moment de la journée 60
Autres paramètres 60

6 • Conclusion **61**

Bibliographie **62**

1 • Notion d'évaluation

Qu'est-ce qu'évaluer ?

Tout le monde connaît la maxime de Thalès : "Connaît-toi toi-même". Là, il s'agit plutôt de connaître l'autre… ce qui n'est pas une mince affaire !
En effet, il est une phase qui revêt une très grande importance dans toute démarche d'individualisation d'un programme : l'évaluation.
Si, dans un premier temps, cette démarche a été beaucoup utilisée dans le milieu clinique avec pour cible les populations ayant des problèmes de santé ou dans la prévention des maladies, elle s'est généralisée pour arriver dans le domaine sportif puis dans la performance de haut niveau.
Mesurer la force, la puissance, la vitesse, la composition corporelle, l'agilité, l'équilibre,… voici autant d'occasions d'évaluer des qualités physiques évoquées dans cet ouvrage.

La littérature est tellement prolixe (3, 6, 11, 17, 33-35, 48) qu'il peut même être un peu déroutant, pour quelqu'un qui s'y intéresse, pour faire le choix des tests les plus ***pertinents***. Car tout le problème est là : ***faire le bon choix***. Les tests qui permettent de rendre compte du potentiel d'un individu sont très (trop ?) nombreux. Certains sont plus connus que d'autres… mais répondent-ils à nos attentes ? Telle est la VRAIE question : réponse à nos attentes, à nos contraintes, à nos objectifs.

Cependant, même si nous pensons avoir fait les bons choix, rien ne peut remplacer l'instant compétitif où l'athlète transcende ses qualités face à l'enjeu (ou quelquefois l'inverse selon sa capacité à gérer son potentiel). Ce qui pourra expliquer les surprises… dans le bon ou le mauvais sens (meilleure ou moins bonne performance que celle attendue).

Beaucoup d'auteurs ou d'institutions ont abordé ce problème et tenté de donner les directives pour la mise en place d'une évaluation dont les résultats serviraient à l'établissement d'un programme d'entraînement physique adapté, personnalisé, optimisé.

Les principes à connaître dans le domaine de l'évaluation ne sont pas compliqués en soi. Leur connaissance peut faire la différence lorsqu'il y a des choix stratégiques à faire. C'est ce que nous allons voir ici.

Pourquoi évaluer ?

Il faut se rendre à l'évidence : le monde est complexe, l'homme est complexe, le sport et la performance sont complexes. Croire que l'on peut améliorer ou maintenir les qualités physiques de quelqu'un sans évaluer est aujourd'hui un non-sens.
L'idée centrale est que l'on ne peut contrôler que ce que nous mesurons. C'est tellement évident qu'il vaut mieux le rappeler pour comprendre la démarche qu'est l'évaluation.
Dans ce contexte, le but de l'évaluation vise à diminuer le niveau de complexité de la situation à gérer. Elle apporte un éclairage sur les pistes éventuelles à explorer, parmi lesquelles nous aurons à faire des choix une nouvelle fois, pour planifier un programme ad hoc.
Pour nous aider, il convient également de comprendre la logique interne de la discipline pour savoir quels paramètres physiologiques sont les plus intéressants à prendre en considération pour mettre en place un suivi individualisé en vue d'atteindre notre objectif, y compris au sein d'une équipe.

Les principaux buts de l'évaluation vont être :

- ***D'identifier les points forts*** d'un athlète par rapport à sa discipline sportive et aux caractéristiques physiques les plus à même de lui faire atteindre la performance visée.
- De fournir un ***retour d'information*** sur les résultats d'un programme pour en mesurer l'efficacité et réorienter les charges d'entraînement si nécessaire.
- D'aider l'athlète à mieux ***comprendre les adaptations*** notamment physiologiques qui s'opèrent durant ce programme en termes de spécificité pour réaliser sa meilleure performance dans le respect de son intégrité physique en particulier.

Les limites de l'évaluation sont connues :

- ***Détection des talents.*** En l'état actuel des connaissances, force est de constater que l'on ne peut prédire à coup sûr si une personne sera ou non un(e) champion(ne) capable de réaliser les performances du plus haut niveau dans une discipline donnée, tellement la performance elle-même est multifactorielle et que les paramètres physiques ne sont pas les seuls déterminants d'une performance (22).
- ***Prévision d'un effet de l'entraînement.*** De même, il est impossible de déterminer quels seront les gains que pourra donner un programme compte tenu de la grande diversité des réponses individuelles à un entraînement physique (Figure 1). Pour autant, les travaux les plus récents dans ce domaine tentent d'apporter des réponses à l'origine de ces différences (39, 40, 68, 70).

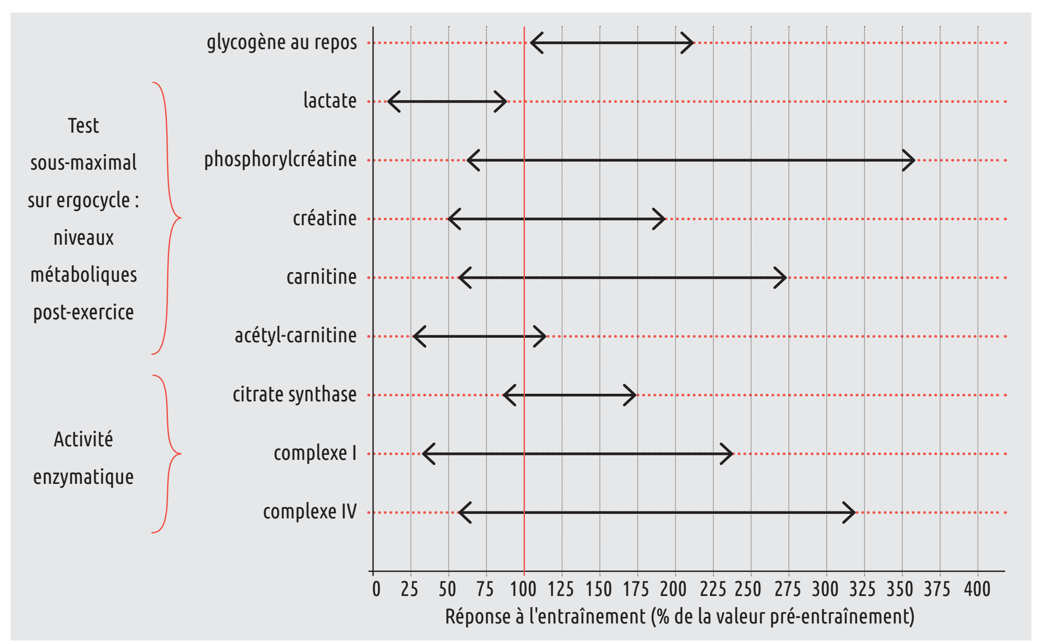


Figure 1 : Analyse systématique des adaptations suite à un entraînement de type aérobie sous-maximal (6 semaines, 4 sessions par semaine, 70 % de $\dot{V}O_2$ max, 192 +/-31 W) d'après Voollard et coll.(70). À noter que la variabilité des paramètres cardiaques et respiratoires est un peu plus homogène (généralement entre de +/-10 % à +/-30 %).

Illustration de la variabilité biologique

Cette caractéristique est tout simplement liée au fait que nous sommes des systèmes biologiques. Les mêmes conditions ne vont pas donner systématiquement les mêmes résultats. Aussi, intégrer le caractère aléatoire d'une mesure physique ou physiologique est fondamental dans un suivi individualisé. C'est ce qu'on tente de mettre en évidence en mesurant la variabilité.

Prenons l'exemple de la fréquence cardiaque (FC) au repos. La valeur, que nous trouvons à l'issue d'une mesure de cette variable est, quelles que soient les conditions (allongé, assis, debout, dans une pièce calme, dans une salle de sport, etc.), une valeur moyenne (nombre) obtenue sur un laps de temps donné (délai ou fenêtre de mesure) et selon une fréquence d'échantillonnage prédéterminée (intervalle entre 2 mesures, par exemple toutes les 10 secondes).

Regardons ensemble la figure 2 : cet enregistrement correspondant à la FC de repos de l'un des auteurs, obtenue avec un cardiofréquencemètre, sur une période de 10 minutes et exprimée en battements par minute (bpm). On voit très bien cette variabilité caractéristique de toute variable biologique qui tend à osciller autour d'une valeur (FC "moyenne") avec une certaine dispersion (écart "standard "par rapport à la valeur moyenne).

Si l'on se contente des 2 premières minutes d'enregistrement réalisées dans une ambiance bruyante, on obtiendra une première estimation de la FC de repos à 65 +/-1 bpm. Mais, une fois supprimées les nuisances sonores (voix humaines fortes en l'occurrence) et exécutés plusieurs mouvements respiratoires, on note une baisse significative de la FC de repos pour se stabiliser autour d'une valeur moyenne de 53 +/– 1 bpm, soit plus de 10 battements en dessous de la première valeur. Pour la calibration de l'entraînement, cela revêt une importance non négligeable.

Au-delà de ce phénomène, somme toute classique, on note également que la FC n'est pas linéaire mais bien fluctuante ; elle est soumise en permanence à des influences opposées, notamment nerveuses, dont nous reparlerons dans le chapitre sur la récupération.

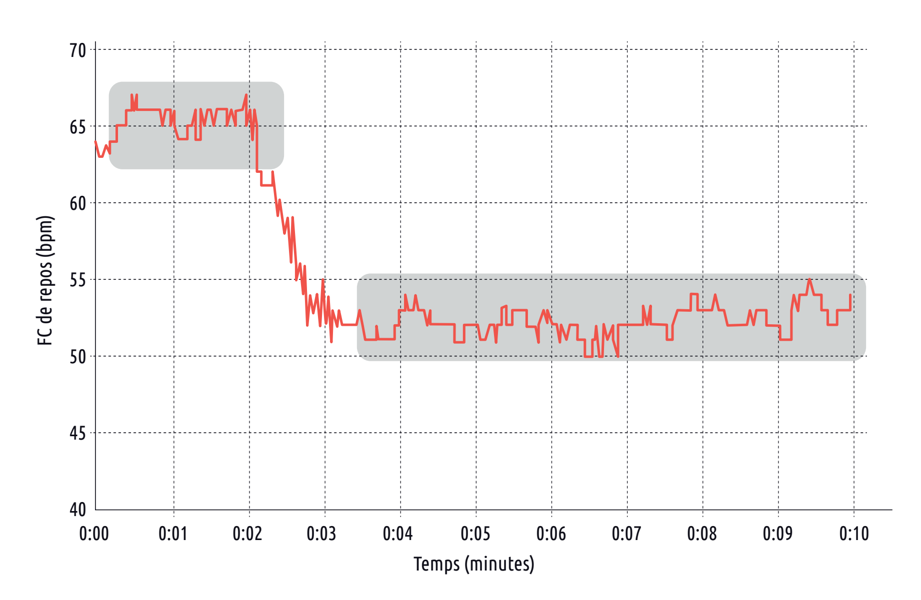


Figure 2 : Exemple d'enregistrement de FC au repos pendant 10 minutes. La valeur moyenne varie selon l'environnement dans lequel la mesure est effectuée entre 65+/-1 bpm durant les 2 premières minutes et 53+/-1 bpm au-delà de 4 min, une fois supprimées les nuisances sonores.

Ce que l'on observe sur la FC de repos est similaire pour toute mesure physiologique ou mécanique (taux de lactate, force maximale, angle articulaire, etc.). Plus l'outil de mesure et le protocole sont précis, plus cette variabilité est évidente. Reste à définir quelle sera la marge considérée comme acceptable pour mettre en évidence un progrès et dire que notre programme de préparation a eu l'effet désiré.

Pour l'exemple de la FC de repos, on pourrait dire que, dès que cette variable s'est stabilisée autour d'une valeur de 5 bpm inférieure, et ce sur une durée d'une semaine par exemple, alors on peut considérer que cette nouvelle FC de repos peut être intégrée dans le calcul de la charge pour individualiser le travail (voir les exemples donnés dans le chapitre 3 sur l'endurance).

2 • Notion de test physique

Qu'appelle-t-on un test ?

C'est très souvent un exercice physique ou un questionnaire standardisé, c'est-à-dire un exercice réalisé en suivant un protocole de passation précis, afin d'obtenir une valeur donnée. Celle-ci peut l'être de façon directe ou indirecte, par observation ou par mesure à l'aide d'un appareil spécifique ou non. Tout exercice ou questionnaire peut donc être en soi un test à partir du moment où on le réalise quasiment toujours dans les mêmes conditions, les mêmes contraintes.
Cependant, pour qu'un exercice soit considéré comme un bon test, il doit répondre à des exigences particulières que nous listons ci-dessous.

Les quatre caractéristiques d'un bon test

Différence entre validation interne et validation externe

Pour bien comprendre la différence entre les deux modes de validation, nous allons faire une analogie avec le tir à l'arc. Arrivé en finale d'une compétition, un archer tire ses 12 flèches sur la cible qui fait 80 cm de diamètre (soit une surface totale de 5 024 cm²) tel que décrit par la figure 3 :

- 1er cas (points roses) : il les disperse toutes autour du blason rouge (zone centrale) sans le toucher, dans une zone couvrant quasiment la zone gris clair (1 800 cm²), sans en mettre une seule au centre.
- 2e cas (points rouges) : il en plante 5 dans un disque de 8 cm de diamètre (50 cm²) correspondant à la zone du blason valant 10 points (centre de la cible), et le reste autour dans une zone couvrant de 200 cm² de façon aléatoire mais en haut à gauche (blasons gris clair et gris foncé).
- 3e cas (points blancs) : il plante avec une très grande régularité.
- 4e cas (points noirs, blason rouge) : nous avons affaire à un spécialiste de la discipline qui les place toutes dans le blason rouge dans une surface correspondant aux 10 points (50 cm²) mais en bas à droite du centre.

- 5e cas (points noirs, blason 10 points) : un vrai champion car il les place toutes dans le centre.

La ***fidélité*** de la mesure (écart entre les flèches) correspond à la ***dispersion*** des flèches et la ***validité*** de la mesure (endroit où l'on a touché la cible) correspond à la ***distance*** par rapport au centre de la cible visée. Dans les 5 cas évoqués, le 4e est typique d'une mesure qui est très bonne au niveau reproductibilité mais qui ne correspond pas à ce que l'on souhaitait au final réellement mesurer. Dans ce cas, il y a divergence entre les résultats attendus et ceux obtenus, et ce malgré une très bonne reproductibilité. L'idéal est donc de faire en sorte de se trouver toujours dans le 5e cas de figure.
Voyons maintenant dans le détail ces différentes caractéristiques d'un test.

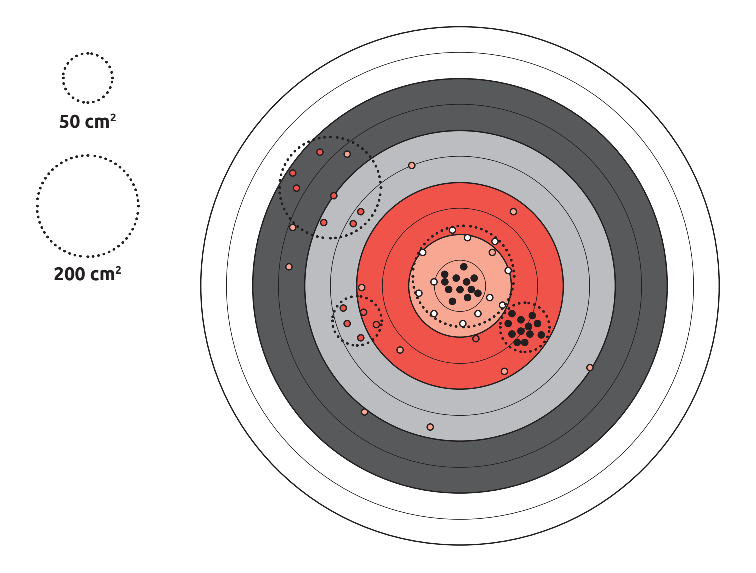


Figure 3 : Différences entre validation interne (fiabilité) et validation externe (validité). On considère que la zone rouge est la zone de validité du test.
- **1er cas : flèches roses. Fiabilité nulle, validité nulle.**
- **2e cas : flèches rouges. Fiabilité faible, validité nulle.**
- **3e cas : flèches blanches. Fiabilité modérée, validité bonne.**
- **4e cas : flèches noires en zone rouge. Fiabilité élevée, validité moyenne.**
- **5e cas : flèches noires en zone rose. Fiabilité élevée, validité excellente.**

Pertinence

La première question à se poser est : "est-ce que le test mesure bien la valeur que je souhaite obtenir, à la discipline sportive analysée ?". Comme nous l'avons évoqué plus haut, c'est la première phase dans le choix d'un test quel qu'il soit. C'est tellement évident qu'il vaut mieux le rappeler. On ne fait pas un test de squat pour avoir la 1RM des membres supérieurs. "Ça va sans dire… mais ça va mieux en le disant "comme le répétait souvent l'un de nos anciens enseignants de DEA.

Fidélité

C'est ce qui va permettre de relier une mesure à elle-même dans le temps lorsque l'on va la répéter dans des sessions différentes (estimation de la force maximale des quadriceps lors d'un mouvement sur presse oblique) ou dans une même session (par exemple une mesure de plis cutanés du biceps). On parle également de ***reproductibilité*** d'un test.
Cette caractéristique est importante si l'on souhaite mesurer les changements d'une performance individuelle et mettre en évidence les améliorations obtenues à la suite d'un entraînement donné.

Cependant, la fidélité n'est pas à elle seule suffisante pour qu'un test soit bon. En effet, on peut mesurer avec une grande reproductibilité quelque chose de faux (4e cas de la figure 3). En revanche, si nous voulons qu'une mesure soit bonne, elle doit être fiable. Donc, plus nous serons capables de répéter une mesure à l'identique et plus nous pourrons mesurer des changements (dits "significatifs") qui montrent qu'il y a bien un effet. Nous serons également aptes à mettre en évidence des variations plus ou moins fines d'une valeur (pouvoir "discriminant "d'un test), ce qui est forcément intéressant d'un point de vue pratique lorsque le niveau de performance demandé est très élevé.

Reste à définir quel degré de changement nous considérons comme suffisant pour confirmer qu'il y a eu progrès ; en d'autres termes, il faudra défi-

nir quelle marge d'erreur est considérée comme acceptable. D'un point de vue statistique, c'est une question de probabilité : avec une marge à 5 %, nous avons 95 % de chance de considérer qu'il y a eu progrès mais aussi 5 % de chance (ou malchance) de se tromper en pensant qu'il y a eu progrès.

Ce choix se fera en fonction du public cible et du niveau de granularité que l'on souhaite utiliser par rapport à la qualité physique évaluée, c'est-à-dire le niveau de finesse de l'image obtenue à l'issue du processus d'évaluation. Ce niveau d'exigence sera forcément plus élevé pour un athlète de haut niveau dont la performance se mesure au 100e de seconde près par exemple. Ceci ne sera certainement pas justifié pour un niveau de pratique plus faible… quoi que !

La fidélité pourrait être anticipée si l'on se pose les questions suivantes : "n'ai-je pas trop fatigué le sujet lors de mon échauffement ? Ai-je fait assez de sessions pour obtenir la "vraie" force maximale du sujet ? L'individu s'est-il réellement donné à fond pendant le test ? Était-il dans les meilleures conditions pour réaliser le test ? Mon appareil est-il bien calibré et donne-t-il le même résultat avec la valeur étalon ?"

Validité

La première question à se poser est de **savoir si le test utilisé mesure bien ce qu'il est censé mesurer**. Par exemple, si c'est la force maximale qui m'intéresse, est-ce que le protocole du test me permet réellement d'accéder à ce paramètre physiologique de l'expression du muscle ?

La validité est importante pour deux raisons : d'abord elle permet d'avoir une variable étalon, point de départ d'un programme d'entraînement physique ; ensuite, sous certaines conditions, elle permet de servir de critère de comparaison entre individus.

Par ailleurs, elle pointe une notion importante qui est la spécificité d'un test en regard d'une discipline donnée. Soyons un peu caricatural : faire un

test sur rameur pour un cycliste sur route est quelque peu incongru, tout le monde le reconnaîtra. Mais pour un athlète spécialiste du 5000 m, dois-je utiliser un protocole intermittent, un test rectangulaire maximal, un test progressif et maximal ? La réponse est ici moins claire. À ce jour, la durée d'un test pour déterminer un paramètre comme le $\dot{V}O_2$max est débattue car il a été mis en évidence qu'un protocole réalisé sur 5 minutes pouvait donner des valeurs plus valides qu'un protocole "classique". Idem pour les protocoles inverses où l'on obtient une valeur de vitesse maximale aérobie plus élevée qu'un test classique car la fatigue est moindre.

On l'aura compris : rien n'est acquis, et les choses évoluent au gré de la curiosité des explorateurs du potentiel sportif des athlètes. Quid enfin des paramètres motivationnels dans ce type de test ?

Objectivité

La dernière caractéristique sur laquelle nous insisterons est l'objectivité du test. On entend par là que ***la mesure effectuée lors d'un test ne doit pas dépendre de la personne qui fait la mesure.*** Si vous mesurez 1,78 m, cette valeur doit être retrouvée quelle que soit la personne qui fera la mesure de votre taille debout… ce qui est somme toute une mesure assez facile à faire.

C'est loin d'être le cas de mesures comme celles des plis cutanés où il a été démontré l'importance de l'expertise de l'évaluateur dans la qualité de cette mesure. Quand on sait l'importance que revêt l'estimation du pourcentage de graisse chez certaines athlètes où le poids est un paramètre ayant une grande influence sur la performance, on comprend qu'il faille passer un long moment à s'exercer avant de faire de telles mesures.

Autres caractéristiques

Parmi les autres caractéristiques que l'on pourrait évoquer sans entrer dans le détail ni être exhaustif, il y a :

- la sécurité/le risque éventuel inhérent à la passation du test en tant que tel car il n'est pas envisageable qu'un sportif soit blessé à l'issue d'une session d'évaluation ;
- le coût de la réalisation du test, comme par exemple le prix les bandelettes ou de l'appareil électronique permettant d'effectuer une lactatémie ;
- le type de matériel nécessaire à la passation du test s'il en existe un particulier comme une pince à plis cutanés, ou la nécessité d'avoir une bande sonore pour calibrer le protocole comme dans le fameux "test navette" ;
- le nombre maximal de personnes pouvant être évaluées en même temps dans le cadre du suivi d'une équipe par exemple ;
- la durée de passation du test entre l'accueil du sportif et le moment où l'on a les résultats de la mesure (on pourrait ajouter le délai pour finaliser l'interprétation de ces résultats) ;
- la nécessité ou non de faire appel à un personnel médical pour effectuer le test (prise d'échantillon sanguin pour une mesure de lactatémie par exemple) ;
- la difficulté de compréhension du test et donc son accessibilité au plus grand nombre ;
- la tranche d'âge pour laquelle le test a été validé ;
- etc.

Des tests spécifiques à chacune des qualités physiques seront abordés dans leur chapitre respectif pour évoquer certaines limites ou intérêts particuliers.

3 • Notion de profil des qualités physiques

Nous l'avons évoqué plus haut : la performance est par définition multifactorielle. On ne peut donc se fier au résultat d'un seul et unique test. Il convient d'en faire passer plusieurs, de natures différentes, pour couvrir l'ensemble des paramètres physiologiques et mécaniques considérés par les spécialistes de la discipline comme les plus pertinents pour la performance et/ou la discipline considérée.
Il est habituellement fait référence aux **qualités physiques** pour désigner les points qui seront mesurés chez un individu donné en relation avec une spécialité sportive donnée. Mais toutes les qualités n'ont pas le même poids selon les spécialités. Par exemple, la souplesse est primordiale pour la gymnastique artistique alors qu'elle n'est que peu impliquée dans la performance en tir à l'arc.

Les principales composantes physiques de la performance

Les plus souvent citées dans la littérature sont les suivantes :

- *la force musculaire et ses variantes* ;
- *l'endurance locale ou musculaire* ;
- *l'endurance globale ou cardio-vasculaire* ;
- *la souplesse* ;
- *la composition corporelle* ;
- *l'équilibre* ;
- la vitesse ;
- la puissance ;
- l'agilité ;
- la coordination ;
- le temps de réaction.

Les 6 premières (en italique) sont communes à celles utilisées pour caractériser le niveau de condition physique en lien avec la santé dans la population générale (non compétitive).

L'utilité du profil

Quand, au début des années 90, l'un d'entre nous a participé, avec Georges Cazorla, à l'évaluation d'une équipe de footballeurs professionnels de ligue 1 et de l'équipe de France de rugby à XV, nous étions loin de nous imaginer les retombées en termes de préparation physique individualisée de cette démarche explorative.
Les programmes physiques élaborés à l'issue de cette phase ont permis non seulement de diminuer certains aspects de la charge d'entraînement, mais aussi aux athlètes de mieux se connaître, de comprendre la spécificité du poste qu'ils occupaient, d'être sensibilisés à la notion de qualité du travail et pas seulement à celle de quantité qu'ils rencontraient.
Un exemple de profil de poste tiré de ces travaux précurseurs est donné ci-dessous.

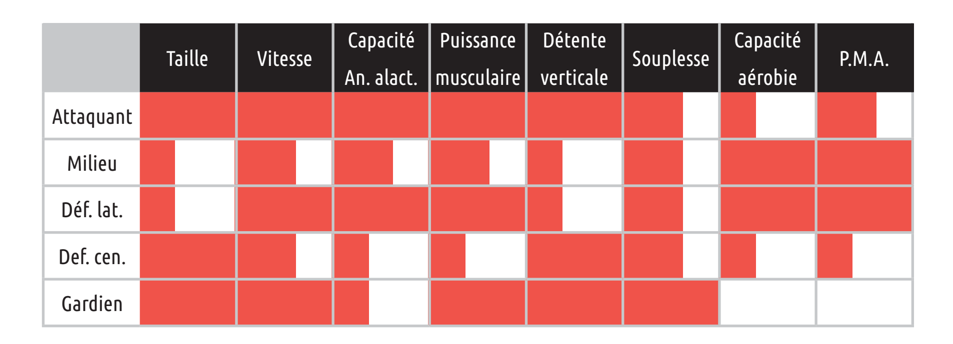


Figure 4 : Récapitulatif des capacités athlétiques et physiologiques requises par poste [d'après Cazorla et Geoffrey (11) p. 233]. Plus la case est remplie, plus le paramètre est pertinent pour le poste. An. Alac = Anaérobie alactique ; muscul. = musculaire ; P.M.A. = puissance maximale aérobie.

Depuis, de nombreux chercheurs et entraîneurs se sont penchés sur cette spécificité des postes pour trouver des exercices, méthodes, outils d'entraînement qui soient les plus adaptés à la progression de chacun dans de multiples disciplines sportives dont nous ne citons que quelques exemples (5, 10, 16, 18, 19, 25, 26, 59).

Autre aspect du suivi individuel

Il est possible de caractériser le profil métabolique d'un sujet, notamment dans le pilier neurophysiologique dont nous avons parlé en introduction. Pour cela, on fera appel à des mesures biologiques plus poussées comme les dosages hormonaux, les marqueurs du stress cellulaire, les dosages des métabolites énergétiques, etc. Cela se pratique davantage dans le cadre d'un suivi biologique et représente un coût souvent élevé sur le long terme.

Depuis 2009, l'Agence Mondiale Antidopage (AMA) a fait une réglementation pour encadrer ce suivi biologique et proposé ce que l'on appelle le "passeport biologique". Le Tribunal Arbitral du Sport (TAS) a reconnu sa validité juridique en 2009 et 2010. Ce document permet de consigner les données recueillies lors des prélèvements sanguins et urinaires. Il est prévu que ce passeport entre en vigueur en France le 1er juillet 2013. Nous sortirions du cadre de cet ouvrage si nous allions plus loin dans le détail de cet outil de suivi ; nous l'évoquons simplement pour montrer comme l'évaluation peut évoluer dans sa complexité et dans son application au domaine sportif.

4 • La mise en place d'un processus d'évaluation

Une fois cela acquis, il est néanmoins nécessaire de mettre en place des processus permettant de répondre aux objectifs premiers de l'évaluation pour qu'elle nous soit utile.
Dans le cadre d'une pratique compétitive, il est intéressant d'avoir des marqueurs de la performance et un regard critique sur l'évolution des qualités physiques du sujet au cours d'une période d'entraînement, d'une saison, d'une carrière.
Cela passe par la mise en place d'un programme d'évaluation dont l'efficacité et la qualité en feront un outil incontournable d'aide à la décision.
Les règles reconnues comme nécessaires à la mise ne place de ce processus sont les suivantes :

- S'assurer de la pertinence des valeurs mesurées par rapport à la discipline sportive considérée, et donc que les tests retenus le sont aussi.
- Vérifier que les tests répondent bien à un protocole reconnu comme valide et qu'ils sont réalisables en toute sécurité pour le pratiquant.
- Faire passer le test dans des conditions qui soient les plus proches possible des conditions compétitives quand cela est possible.
- Mettre en place les conditions d'une très bonne reproductibilité pour être sûr que l'on pourra comparer les valeurs dans le temps et s'assurer qu'une évolution est bien due au programme physique lui-même.
- Nommer un superviseur pour les sessions d'évaluations qui vérifiera que les protocoles sont strictement respectés, que le recueil des données est correctement réalisé, que les personnes ont été clairement informées sur leurs droits (cf. CNIL pour les bases de données).
- Répéter régulièrement les mesures à une cadence qui sera fonction de la nature du paramètre mesuré, du niveau de condition physique et du niveau d'expertise de l'athlète, des recommandations éventuelles issues de consensus scientifiques concernant cette régularité.
- Bien expliquer les résultats à l'athlète et l'entraîneur, les contextualiser en fonction du moment de la saison, des périodes ou des enjeux compétitifs importants.

Cela étant, nous vous proposons la démarche que nous utilisons depuis plus de 20 ans pour gérer nos propres accompagnements. Ce n'est qu'une proposition qui reflète notre approche de la préparation physique, la façon de nous organiser. Elle peut ne pas convenir à tout le monde. À chacun de la modifier, de la triturer dans tous les sens pour trouver celle qui lui convient le mieux.

Mais par expérience, nous pensons aujourd'hui que c'est la plus aboutie car elle est en adéquation avec ce que l'on sait comme étant efficient, sécuritaire et utile en matière de suivi individualisé quel que soit le niveau de pratique sportive. Elle est partagée par de nombreuses personnes qui l'utilisent à leur façon, selon leur propre conception, bien évidemment. Elle présente simplement l'avantage de ne rien oublier dans le processus de préparation physique.

Elle consiste en trois étapes, chacune étant plus ou moins détaillée sans pour autant vous submerger d'informations. Pour plus de facilité, nous n'en donnons que les illustrations pour avoir une vision globale.

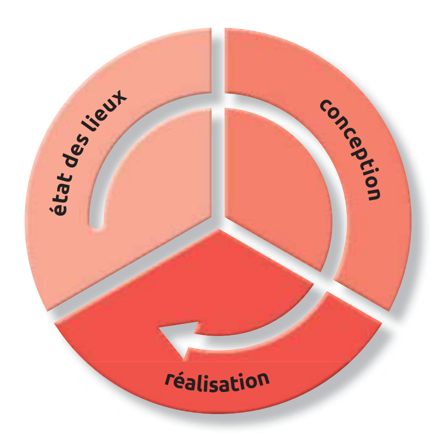


Figure 5 : Les trois phases d'une préparation physique individualisée. L'état des lieux est le temps d'évaluation. La conception est la phase de réflexion et de choix des méthodes et outils qui conviennent le mieux à la mise en place des séances physiques pour faire progresser ou maintenir le niveau souhaité. La réalisation est le temps d'application sur le terrain de ce que l'on aura imaginé. À tout moment, les échanges avec l'entraîneur et le sportif peuvent nous apporter des éclairages sur ce qui sera le plus pertinent.

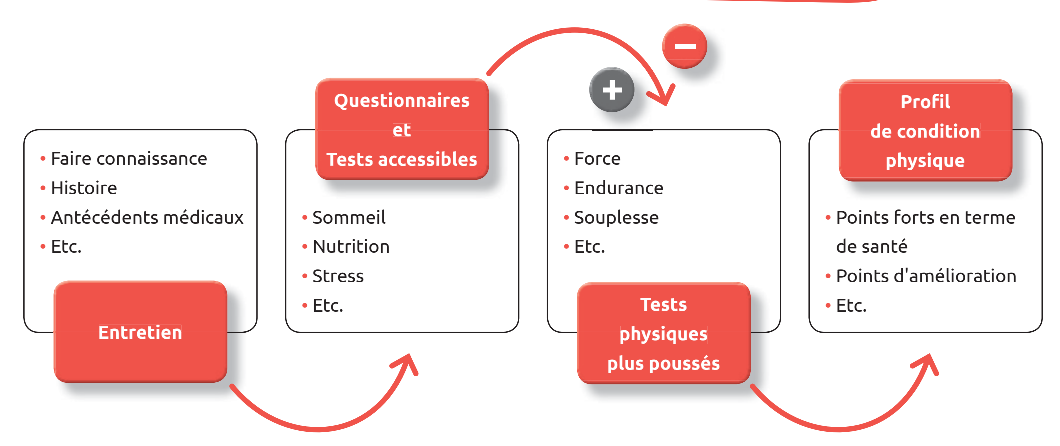


Figure 6 : État des lieux. Première phase du processus d'accompagnement individualisé. Elle se déroule en quatre temps avec passage de certains tests selon avis médical + ou –.

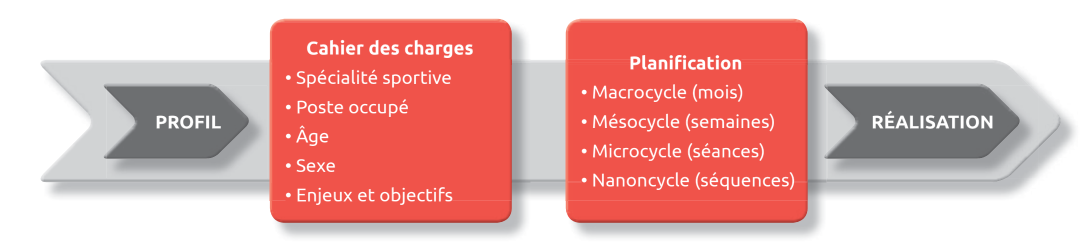


Figure 7 : Conception. Seconde phase consistant en l'analyse, la réflexion, la stratégie, les choix notamment des indicateurs de suivi, la planification (linéaire, périodisée,...).

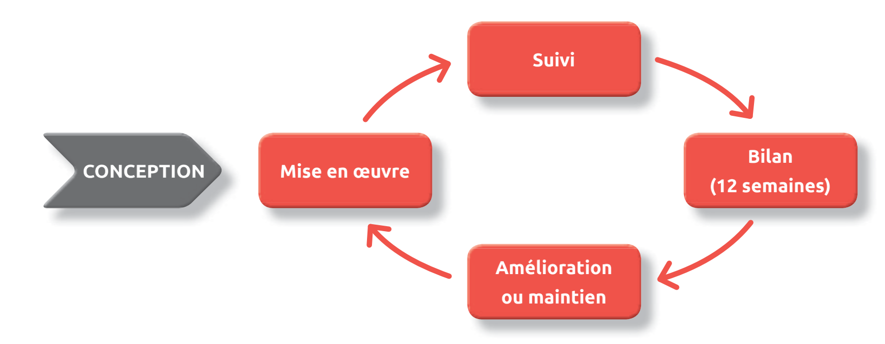


Figure 8 : Réalisation. Troisième phase où l'on passe à l'application sur le terrain en vérifiant les indicateurs du suivi choisis au préalable pour s'assurer de la progression ou non du sujet et faire un bilan (répétition et comparaison des tests).

Importance du choix des tests

Nous ne passerons pas en revue les centaines de tests que nous avons pu trouver dans la littérature. Qui plus est, il en est proposé de nouveaux tous les ans. Il existe plusieurs raisons à cela :

- Soit l'on s'est aperçu que les tests existants n'étaient pas forcément adaptés à la mesure physique que l'on souhaitait obtenir.
- Soit les tests disponibles manquaient de spécificité par rapport à la discipline sportive que l'on souhaitait explorer.
- Soit l'évolution de nos connaissances biologiques fait qu'un protocole est reconnu plus valide qu'un autre.
- Soit le public initialement utilisé pour valider le test est trop restrictif et empêche l'exploitation des résultats (par exemple un test validé avec un public adulte est inutilisable avec un public enfant).
- Soit, comme nos hommes politiques, les scientifiques souhaitent que leur test soit utilisé en lieu et place de ceux des autres pour raison d'ego… mais cela sort quelque peu du cadre de notre ouvrage.

En revanche, ce qu'il est important de souligner, c'est la pertinence du test par rapport à la discipline sportive et surtout à l'exploration de la performance physique de celui-ci dans un contexte particulier. En ce sens, le choix peut s'orienter vers un test plutôt qu'un autre, non pas vers un test connu que tout le monde utilise, mais bien vers un test plus précis car plus pertinent en regard de la nature de la performance réalisée en compétition en compétition. Nous illustrerons cela dans les différents chapitres traitant de façon spécifique les qualités physiques.

Importance de l'ordre des tests

Lorsque l'on décide de faire un profil des compétences physiques d'une personne à l'aide d'une batterie de tests (et non pas un seul test pour évaluer une qualité physique de façon isolée), il est conseillé de faire les tests dans un ordre particulier pour maximiser la fiabilité des mesures. Ceci est

particulièrement illustré dans les tests de force sous différentes conditions (isométrique, isotonique, isocinétique,...), à certains moments de la journée.
Récemment, il a été proposé de suivre les recommandations suivantes pour les batteries de tests (30) :

- Tests non fatigants (comme les mesures anthropométriques, les mesures cardiaques de repos, etc.) ;
- Tests d'agilité ;
- Tests de force et de puissance ;
- Tests de vitesse ;
- Tests d'endurance musculaire ;
- Test de fatigue anaérobie ;
- Tests de capacité aérobie.

Le moment de la journée peut aussi avoir son importance car il affecte le niveau de performance maximale qui peut être produit indépendamment de tout signe de fatigue. Pour la souplesse par exemple, il est démontré que celle-ci augmente au cours de la journée et affecte donc le niveau d'amplitude articulaire obtenu à l'issue d'un test (cf. voir le chapitre sur la souplesse pour plus de précisions).

Exemple pour la composition corporelle

Néanmoins, nous pouvons déjà donner un exemple de cette démarche pour l'analyse de la composition corporelle que nous avons personnellement beaucoup utilisée dans le cadre du suivi des gymnastes artistiques.

Prenons une équipe de jeunes gymnastes féminines (10-13 ans). Nous envisageons de mesurer l'évolution de leur composition corporelle car elles sont dans une période qualifiée de "prépubère" pour certaines et de pubère pour d'autres. Or, il est établi aujourd'hui que l'entrée en phase pubertaire entraîne de fortes modifications de physiologie, de composition corporelle et, notamment, de la masse grasse (4, 47).

Nous utilisons la méthode des plis cutanés en respectant scrupuleusement les normes de l'ISAK (International Standards for Anthropometric Assessment) pour le positionnement des marques de plis afin de rendre reproductibles les mesures.

Seulement, pour interpréter les mesures obtenues, il faut passer par un calcul mathématique impliquant l'utilisation d'une équation donnant le pourcentage de graisse à partir de ces mesures. C'est là que les choses se compliquent. Pour les enfants, il existe pas moins de 23 équations dans la littérature, chacune correspondant à des groupes très variés. Il nous faut restreindre alors notre choix à partir de critères qui nous semblent les plus pertinents pour notre projet concernant l'échantillon utilisé pour donner l'équation, notamment :

- le nombre de plis cutanés utilisés ;
- l'âge des sujets ;
- la(les) spécialité(s) sportive(s) ;
- le niveau de pratique ;
- l'ethnie ;
- le sexe.

Une fois ce filtre établi, il ne reste plus que 2 ou 3 équations possibles. L'utilisation d'un tableur facilitera grandement la tâche pour le suivi par l'automatisation des calculs (35).

5 • Conditions de réalisation d'un test

Le débat est très animé dans le domaine de la préparation physique et de l'entraînement concernant les modalités d'exercice (notamment l'intérêt ou non de l'échauffement, des étirements, de la nutrition préalable, la posture à adopter sur l'appareil, le moment de la journée, etc.) pour évaluer un paramètre physiologique dans des conditions maximales (2, 37, 38, 41, 49, 72).

Une première question serait : faut-il faire un échauffement général et/ou spécifique pour un test de 1RM[15] ? Par "général", il faut comprendre la réalisation par exemple d'une phase de 5 minutes sur ergocycle de travail cardio sous-maximal avant de réaliser un test de 1RM des membres inférieurs par exemple. Par "spécifique", on entend la réalisation de mouvements mimant celui qui va être réalisé durant le test d'évaluation. En cela, on rejoint le paragraphe suivant sur la PPA.

Potentialisation post-activation

En effet, concernant l'évaluation des paramètres de force, puissance ou vitesse maximales, de nombreux auteurs se sont intéressés à la potentialisation post-activation ou PPA. Ce phénomène, connu de longue date mais pas entièrement élucidé (55-58), peut avoir une influence sur la performance produite au moment du test en fonction de ce qui s'est passé avant ledit test. En effet, la contraction musculaire est dépendante de ce qui précède notamment en termes de niveau d'activation.

Pour comprendre son fonctionnement, il a été proposé que le maintien d'une tension musculaire était le résultat d'influences facilitatrices et inhibitrices d'origine neuromusculaire (7). Dans ce contexte, la PPA pourra ou non améliorer la performance musculaire en fonction du contexte de fatigue créé préalablement au test. Par conséquent, un échauffement pour-

15 / 1RM = charge maximale que l'on peut soulever lors d'un mouvement donné en une seule et unique fois.

ra soit améliorer, soit diminuer la performance maximale selon la façon dont il aura été géré (8, 9, 20, 21).
Ce phénomène contradictoire entre facilitation et inhibition a été illustré par plusieurs travaux (1, 24, 27, 46, 69). Par exemple, lors d'un test de 1RM des membres inférieurs (1), on peut obtenir une valeur de plus de 8 % supérieure avec un échauffement combinant une forme générale et une forme spécifique par rapport à un échauffement spécifique seul. À l'opposé, pour l'évaluation de la puissance musculaire chez des cyclistes de piste très entraînés, un échauffement standard d'une quarantaine de minutes pourra générer trop de fatigue des jambes, entraînant une diminution du pic de puissance que l'on observera pas après un échauffement plus court de 15 minutes environ (69). Cela peut s'expliquer en partie par le fait que chez une personne entraînée, les mécanismes permettant d'atteindre le $\dot{V}O_2max$ se mettent en marche de façon plus précoce.

La vitesse de mouvement

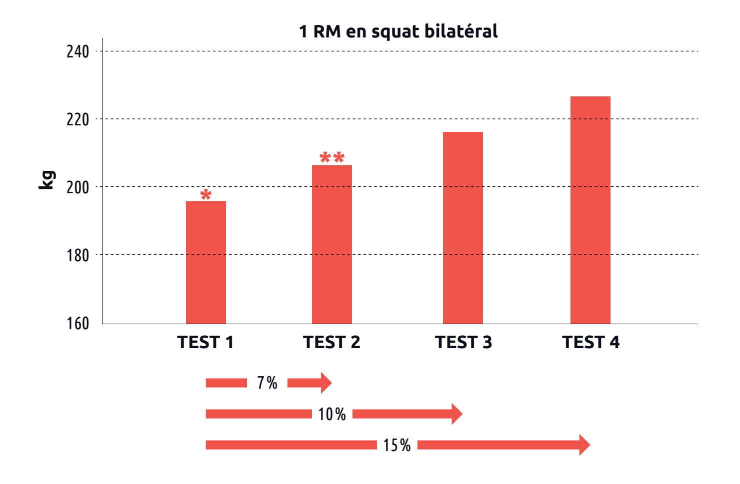
C'est un paramètre peu étudié et qui pourtant devrait être pris en considération lors de l'évaluation. En effet, on sait de longue date qu'il existe une relation inversement proportionnelle entre la charge mobilisée et la vitesse de mouvement dans la phase concentrique : plus la charge soulevée est lourde, plus la vitesse du mouvement est lente, en demandant à chaque fois au sujet de mobiliser la charge le plus rapidement possible. Dans la phase excentrique, il y a une augmentation de la vitesse proportionnelle à la charge. Néanmoins, cette relation plafonne : au-delà d'une certaine vitesse de mouvement durant l'allongement du muscle, il n'y a plus d'augmentation de la tension musculaire.
Partant de ces considérations, on peut s'interroger sur l'influence de la vitesse d'exécution du mouvement pendant un test de 1 RM. Récemment, cette question a été illustrée par la comparaison de 2 protocoles de développé-couché (32) très utilisés dans le milieu sportif : les cadences 2-0-2 et 2-0-4. À savoir, 2 secondes de phase concentrique et 2 ou 4 secondes de phase excentrique. Il s'avère que la cadence plus rapide en excentrique permet d'obtenir une 1RM plus élevée. Donc, exécuter un mouvement

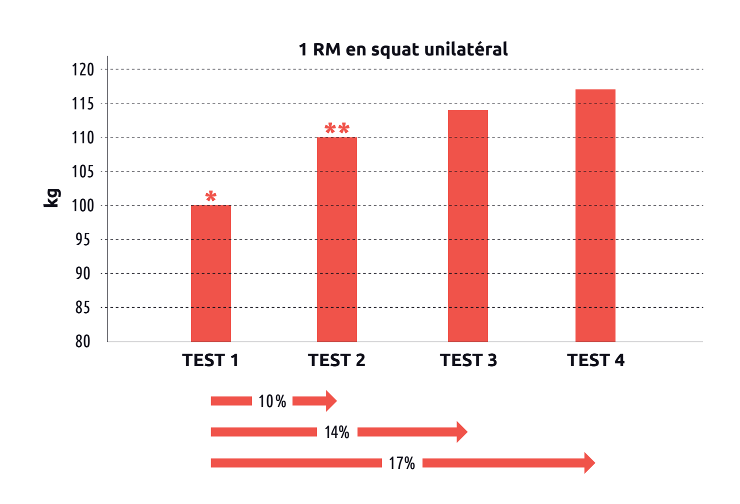
trop lentement pourrait générer plus de fatigue et empêcherait la potentialisation neuromusculaire liée à la répétition du mouvement lui-même.

La connaissance préalable du test

L'effet de l'apprentissage sur le résultat d'une évaluation, quel que soit le type de test, est aussi connu de longue date (42, 51, 60, 67).
Pour que la force maximale puisse être obtenue d'une façon valide et fiable (facilitant ainsi les comparaisons), il convient donc de préparer l'individu à ce type de performance inhabituelle car réalisée hors contexte compétitif. L'expérience antérieure de la personne dans ce type d'exercice a son importance tant dans la valeur maximale que l'on va obtenir à l'issue du test que dans la reproductibilité de cette mesure (53). Chez les sujets pratiquant la musculation depuis plus de 2 ans, la répétition d'une session d'évaluation de la 1RM donnera les mêmes valeurs, toute chose égale par ailleurs. Pour les autres personnes, notamment les novices vis-à-vis d'un exercice ou d'un protocole donné, il faudra plus de séances (généralement 2 à 3 sessions) pour obtenir une valeur représentative du niveau réelle de la personne ; en effet, elle devra apprendre au préalable à exécuter le geste dans le respect des consignes de sécurité et de bonne qualité technique. L'utilisation d'un indice de familiarisation avec la procédure de test pourrait être intéressante à ce moment-là (15, 62).
Partant du principe que les protocoles sont réalisés dans de bonnes conditions, le fait qu'une personne ne soit pas familiarisée avec un exercice de musculation peut expliquer à lui seul les améliorations de la force observées. Il n'est pas rare de voir une augmentation de 10 % (ou plus) de la force musculaire chez des débutants, lors de la phase initiale d'un programme, après seulement 2 semaines d'entraînement intense (29).
Une démonstration quasi magistrale de cet effet est donnée par une récente étude (15). Quatre sessions ont été programmées pour évaluer la 1RM du haut et du bas corps en uni- et bilatéral (squat bilatéral, squat unilatéral, développé-couché). Aucun entraînement n'a été réalisé entre ces 4 sessions séparées entre elles de 7 à 10 jours. Les sujets ne devaient rien changer à leurs habitudes de vie, ni pratiquer quelque forme que ce soit

de renforcement musculaire. La figure 9 ci-après montre le résultat des 4 évaluations : les auteurs mettent en évidence une augmentation de 7 à 10 % une semaine après l'évaluation initiale, de 10 à 14 % dans les deux semaines, et 14 à 17 % dans les trois semaines. Les étoiles sur les valeurs de tests signalent celles qui sont considérées comme de réelles augmentations. On constate qu'après les deux premiers tests, les résultats évoluent beaucoup moins, signe que le sujet commence à bien maîtriser son geste et à le reproduire avec la même efficacité.





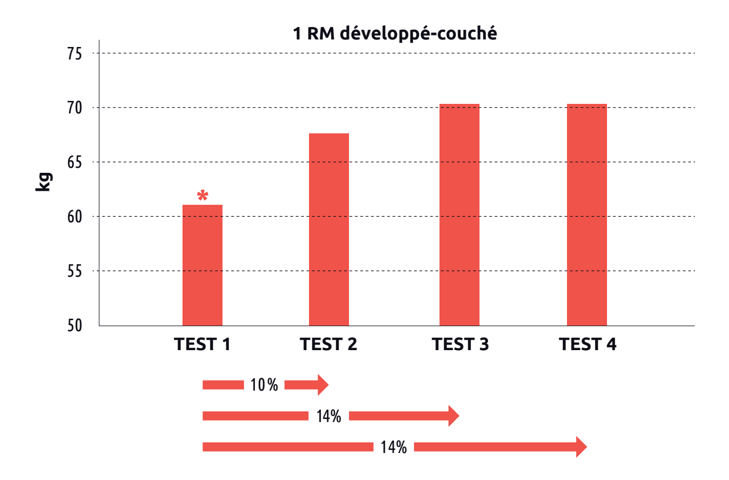


Figure 9 : Évolution des résultats de 4 évaluations de la 1RM chez des novices en musculation. Les 4 sessions sont séparées de 7 à 10 jours. Aucun entraînement n'est autorisé. Les étoiles signifient que les valeurs sont significativement élevées. Seules les 2 premières semaines résultent en des améliorations significatives au niveau statistique. (D'après Cronin et Henderson (15)).

Les mouvements utilisés pour faire les évaluations de la 1RM pourraient constituer en eux-mêmes une forme d'entraînement, et donc cette forme d'entraînement réalisée une fois par semaine (mobilisation de charges intenses en 1 ou 2 répétitions) constituerait un stimulus pouvant induire les changements observés chez ces novices. Par conséquent, il est suggéré de faire précéder toute évaluation de la 1RM d'une phase d'entraînement pour initier les personnes débutantes afin d'éviter toute variation de la 1RM qui serait uniquement due à l'apprentissage (54, 71).

Le niveau d'engagement dans le test

L'état psychique dans lequel se trouve l'individu et son aptitude à s'imaginer ou reproduire mentalement le mouvement avec des charges maximales, jouent tous deux aussi un rôle important, notamment dans la capacité à stimuler de façon maximale les motoneurones responsables de l'activation des groupes musculaires mis en jeu. Le niveau d'expertise



entre en plus en considération (28, 43-45, 52, 61, 74). Nous reviendrons sur ce point à propos de l'évaluation et l'entraînement de l'explosivité entre autres.

Le moment de la journée

Un autre facteur pouvant affecter le niveau de production maximale d'un paramètre physiologique ou mécanique est l'heure de la journée à laquelle se déroule la session d'évaluation (2, 13, 14, 31, 63-66, 75, 76), avec notamment l'impact de la température corporelle sur la variabilité de la performance.

Autres paramètres

Nous pouvons enfin évoquer les paramètres de spécificité de l'exercice, de posture adoptée pour faire un mouvement de musculation (71, 73), de délai entre 2 sessions d'évaluation, notamment pour éviter que des courbatures d'une session précédente ne viennent gêner l'individu dans celle qui est programmée plus tard, la nature de la modalité de contraction musculaire en chaîne ouverte ou fermée (50) ou tout simplement la forme du protocole utilisé (12, 36). Enfin, l'emploi de certaines formules prédictives sera évoqué dans les différents chapitres en fonction de leur intérêt à préserver l'état physique de l'athlète ou par le gain de temps qu'elles représentent si elles sont suffisamment précises.

6 • Conclusion

Vous l'aurez compris : l'évaluation n'est pas une partie de plaisir. Un minimum de rigueur, de préparation et de prévision des éléments pouvant affecter la mesure est primordial pour garantir la validité et la fidélité du résultat, et ce d'autant plus que la personne pratique à haut niveau.

Grâce à l'ensemble des informations exposées dans ce chapitre, il est plus facile de comprendre que, pour obtenir des valeurs lors de tests d'évaluation, il est important de connaître les facteurs d'influence de la performance physique en elle-même ; cela va des facteurs environnementaux jusqu'à ceux liés à l'individu.

Le choix de la forme, de l'intensité, de la durée, de la fréquence des exercices préalables utilisés comme échauffement peut à lui-seul expliquer pourquoi cette phase préliminaire donne des effets si différents sur la performance obtenue à l'issue d'une séance d'évaluation (8, 9, 23).

Que cette performance soit utilisée pour la comparer à celle d'autres personnes du même sexe, du même âge et/ou du même niveau de condition physique, ou qu'elle soit utilisée comme valeur d'étalonnage de l'intensité d'un programme d'entraînement, il est indispensable de savoir si elle est valide et fidèle à ce que l'on pense être la valeur/référence représentative de l'état physique dans lequel se trouve un individu à un instant t. Mieux vaut anticiper que de se rendre compte que ce que l'on a fait comme tests et comme mesures s'avère inutilisable sur le terrain !

Un marin, un pilote, un guide haute montagne se renseignent sur la météorologie avant de s'engager dans l'action. La décision du moment du départ n'en sera que plus fiable. L'évaluation sert à prendre la bonne décision et à savoir quand en changer.

Bibliographie

• 1 • Abad CC, Prado ML, Ugrinowitsch C, Tricoli V, and Barroso R. Combination of general and specific warm-ups improves leg-press one repetition maximum compared with specific warm-up in trained individuals. J Strength Cond Res 25: 2242-2245, 2011.

• 2 • Abernethy P, Wilson G, and Logan P. Strength and power assessment. Issues, controversies and challenges. Sports Med 19: 401-417, 1995.

• 3 • Allard MC, G.; Chaveau, D.; Dine, G.; Distinguin, F.; Dolle, G.; Dubourg, R.; Jousselin, E.; Lacour, J.R.; Laporte, G.; Leger, L.; Montpetit, R.; Péronnet, F.; Porte, G.; Senegas, J.; Stoicheff, H.; Vignes, J.; Walch, G.;. Evaluation physiologique et traumatologie en sport. Presented at Colloque Aquitaine Sciences et Sports, Bordeaux, 1992.

• 4 • Armstrong N and McManus AM. Physiology of elite young male athletes. Med Sport Sci 56: 1-22, 2011.

• 5 • Austin DJ and Kelly SJ. Positional Differences in Professional Rugby League Match Play Through the Use of Global Positioning Systems. The Journal of Strength & Conditioning Research 27: 14-19, 2013.

• 6 • Australian Institute of Sport A. Physiological Tests for Elite Athletes. Champaign: Human Kinetics, 2013.

• 7 • Behm DG. Force maintenance with submaximal fatiguing contractions. Can J Appl Physiol 29: 274-290, 2004.

• 8 • Bishop D. Warm up I: potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. Sports Med 33: 439-454, 2003.

• 9 • Bishop D. Warm up II: performance changes following active warm up and how to structure the warm up. Sports Med 33: 483-498, 2003.

• 10 • Castagna C and Barbero Álvarez JC. Physiological Demands of an Intermittent Futsal-Oriented High-Intensity Test. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 2322-2329 2310.1519/JSC.2320b2013e3181e2347b2329, 2010.

• 11 • Cazorla G et Geoffroy R. L'évaluation en activité physique et en sport. Presented at Actes du Colloque International de la Guadeloupe, Guadeloupe, 1990.

• 12 • Christ CB, Boileau RA, Slaughter MH, Stillman RJ, and Cameron J. The effect of test protocol instructions on the measurement of muscle function in adult women. J Orthop Sports Phys Ther 18: 502-510, 1993.

• 13 • Chtourou H, Driss T, Souissi S, Gam A, Chaouachi A, and Souissi N. The Effect of Strength Training at the Same Time of the Day on the Diurnal Fluctuations of Muscular Anaerobic Performances. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 217-225, 2012.

• 14 • Chtourou H and Souissi N. The Effect of Training at a Specific Time of Day: A Review. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 1984-2005, 2012.

• 15 • Cronin JB and Henderson ME. Maximal strength and power assessment in novice weight trainers. J Strength Cond Res 18: 48-52, 2004.

• 16 • Cunniffe B, Proctor W, Baker JS, and Davies B. An Evaluation of the Physiological Demands of Elite Rugby Union Using Global Positioning System Tracking Software. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 1195-1203, 2009.

• 17 • Duncan MacDougall JW, H.A.; Green, H.J. L'évaluation physiologique de l'athlète de haut niveau. Paris: Décarie-Vigot, 1982.

• 18 • Duncan MJ, Woodfield L, and al-Nakeeb Y. Anthropometric and physiological characteristics of junior elite volleyball players. Br J Sports Med 40: 649-651; discussion 651, 2006.

• 19 • Dwyer DB and Gabbett TJ. Global Positioning System Data Analysis: Velocity Ranges and a New Definition of Sprinting for Field Sport Athletes. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 818-824 810.1519/JSC.1510b1013e3182276555, 2012.

• 20 • Esformes JI, Cameron N, and Bampouras TM. Postactivation Potentiation Following Different Modes of Exercise. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 1911-1916, 2010.

• 21 • Esformes JI, Keenan M, Moody J, and Bampouras TM. Effect of Different Types of Conditioning Contraction on Upper Body Postactivation Potentiation. The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 143-148, 2011.

• 22 • Ford P, De Ste Croix M, Lloyd R, Meyers R, Moosavi M, Oliver J, Till K, and Williams C. The long-term athlete development model: physiological evidence and application. J Sports Sci 29: 389-402, 2011.

• 23 • Fradkin AJ, Zazryn TR, and Smoliga JM. Effects of warming-up on physical performance: a systematic review with meta-analysis. J Strength Cond Res 24: 140-148, 2010.

• 24 • French DN, Kraemer WJ, and Cooke CB. Changes in dynamic exercise performance following a sequence of preconditioning isometric muscle actions. J Strength Cond Res 17: 678-685, 2003.

• 25 • Gabbett TJ. Physiological and anthropometric characteristics of amateur rugby league players. British journal of sports medicine 34: 303-307, 2000.

• 26 • Gabbett TJ. Physiological and Anthropometric Characteristics of Elite Women Rugby League Players. The Journal of Strength & Conditioning Research 21: 875-881, 2007.

• 27 • Gerbino A, Ward SA, and Whipp BJ. Effects of prior exercise on pulmonary gas-exchange kinetics during high-intensity exercise in humans. J Appl Physiol 80: 99-107, 1996.

• 28 • Guillot A, Lebon F, Rouffet D, Champely S, Doyon J, and Collet C. Muscular responses during motor imagery as a function of muscle contraction types. International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology 66: 18-27, 2007.

• 29 • Hakkinen K. Factors influencing trainability of muscular strength during short term and prolonged training. Natl Strength Cond Assoc J 7: 32-37, 1985.

• 30 • Harman EA. Principles of test selection and administration., in: Essentials of strength training and conditioning. TRE Baechle, R.W., ed. Champaign: Human Kinetics, 2008, pp 237-247.

• 31 • Hayes LD, Bickerstaff GF, and Baker JS. Interactions of cortisol, testosterone, and resistance training: influence of circadian rhythms. Chronobiology international 27: 675-705, 2010.

• 32 • Headley SA, Henry K, Nindl BC, Thompson BA, Kraemer WJ, and Jones MT. Effects of Lifting Tempo on One Repetition Maximum and Hormonal Responses to a Bench Press Protocol. The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 406-413, 2011.

• 33 • Heyward VH. Evaluation of body composition. Current issues. Sports Med 22: 146-156, 1996.

• 34 • Heyward VH. Advanced fitness assessment and exercise prescription. Champaign: Human Kinetics, 2010.

• 35 • Heyward VHW, D.R. Applied body composition assessment. Champaign: Human Kinetics, 2004.

• 36 • Hoppe MW, Baumgart C, Sperlich B, Ibrahim H, Jansen C, Willis SJ, and Freiwald J. Comparison Between Three Different Endurance Tests in Professional Soccer Players. The Journal of Strength & Conditioning Research 27: 31-37, 2013.

• 37 • Jo E, Judelson DA, Brown LE, Coburn JW, and Dabbs NC. Influence of Recovery Duration After a Potentiating Stimulus on Muscular Power in Recreationally Trained Individuals. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 343-347, 2010.

• 38 • Judelson DA, Maresh CM, Anderson JM, Armstrong LE, Casa DJ, Kraemer WJ, and Volek JS. Hydration and muscular performance: does fluid balance affect strength, power and high-intensity endurance? Sports Med 37: 907-921, 2007.

• 39 • Keller P, Vollaard N, Babraj J, Ball D, Sewell DA, and Timmons JA. Using systems biology to define the essential biological networks responsible for adaptation to endurance exercise training. Biochemical Society transactions 35: 1306-1309, 2007.

• 40 • Keller P, Vollaard NB, Gustafsson T, Gallagher IJ, Sundberg CJ, Rankinen T, Britton SL, Bouchard C, Koch LG, and Timmons JA. A transcriptional map of the impact of endurance exercise training on skeletal muscle phenotype. J Appl Physiol 110: 46-59, 2011.

• 41 • Kraft JA, Green JM, Bishop PA, Richardson MT, Neggers YH, and Leeper JD. The influence of hydration on anaerobic performance: a review. Res Q Exerc Sport 83: 282-292, 2012.

• 42 • Kroll W. Reliability of a selected measure of human strength. Res Quart for Ex and Sport: 7, 1962.

• 43 • Lebon F, Byblow WD, Collet C, Guillot A, and Stinear CM. The modulation of motor cortex excitability during motor imagery depends on imagery quality. The European journal of neuroscience 35: 323-331, 2012.

• 44 • Lebon F, Collet C, and Guillot A. Benefits of motor imagery training on muscle strength. J Strength Cond Res 24: 1680-1687, 2010.

• 45 • Lebon F, Rouffet D, Collet C, and Guillot A. Modulation of EMG power spectrum frequency during motor imagery. Neuroscience letters 435: 181-185, 2008.

• 46 • Macintosh BR, Robillard ME, and Tomaras EK. Should postactivation potentiation be the goal of your warm-up? Appl Physiol Nutr Metab 37: 546-550, 2012.

• 47 • McManus AM and Armstrong N. Physiology of elite young female athletes. Med Sport Sci 56: 23-46, 2011.

• 48 • Miller TE. NSCA's Guide to tests and assessments. Champaign: Human Kinetics, 2012.

• 49 • Osternig LR. Isokinetic dynamometry: implications for muscle testing and rehabilitation. Exerc Sport Sci Rev 14: 45-80, 1986.

• 50 • Pincivero DM, Lephart SM, and Karunakara RG. Relation between open and closed kinematic chain assessment of knee strength and functional performance. Clin J Sport Med 7: 11-16, 1997.

• 51 • Ploutz-Snyder LL and Giamis EL. Orientation and familiarization to 1RM strength testing in old and young women. J Strength Cond Res 15: 519-523, 2001.

• 52 • Ranganathan VK, Siemionow V, Liu JZ, Sahgal V, and Yue GH. From mental power to muscle power--gaining strength by using the mind. Neuropsychologia 42: 944-956, 2004.

• 53 • Ritti-Dias RM, Avelar A, Salvador EP, and Cyrino ES. Influence of previous experience on resistance training on reliability of one-repetition maximum test. J Strength Cond Res 25: 1418-1422, 2011.

• 54 • Rutherford OM and Jones DA. The role of learning and coordination in strength training. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 55: 100-105, 1986.

• 55 • Sale DG. Postactivation potentiation: role in human performance. Exerc Sport Sci Rev 30: 138-143, 2002.

• 56 • Sale DG. Postactivation potentiation: role in performance. Br J Sports Med 38: 386-387, 2004.

• 57 • Sale DG, MacDougall JD, Upton AR, and McComas AJ. Effect of strength training upon motoneuron excitability in man. Med Sci Sports Exerc 15: 57-62, 1983.

• 58 • Sale DG, Upton AR, McComas AJ, and MacDougall JD. Neuromuscular function in weight-trainers. Experimental neurology 82: 521-531, 1983.

• 59 • Sanchez-Munoz C, Sanz D, and Zabala M. Anthropometric characteristics, body composition and somatotype of elite junior tennis players. Br J Sports Med 41: 793-799, 2007.

• 60 • Sapega AAN, J. A.; Sokolow, D.; Saranti, A.;. The nature of torque"overshoot" in Cybex isokinetic dynamometry. Med Sci Sports and Exerc 14: 9, 1982.

• 61 • Siemionow V, Yue GH, Ranganathan VK, Liu JZ, and Sahgal V. Relationship between motor activity-related cortical potential and voluntary muscle activation. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 133: 303-311, 2000.

• 62 • Soares-Caldeira LF, Ritti-Dias RM, Okuno NM, Cyrino ES, Gurjão ALD, and Ploutz-Snyder LL. Familiarization Indexes in Sessions of 1-RM Tests in Adult Women. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 2039-2045, 2009.

• 63 • Souissi H, Chtourou H, Chaouachi A, Dogui M, Chamari K, Souissi N, and Amri M. The effect of training at a specific time-of-day on the diurnal variations of short-term exercise performances in 10- to 11-year-old boys. Pediatr Exerc Sci 24: 84-99, 2012.

• 64 • Taylor J, Weston M, and Portas MD. The effect of a short, practical warm-up protocol on repeated-sprint performance. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 1–16, 2012.

• 65 • Taylor K-L, Barker M, Cronin J, Gill N, Chapman D, and Sheppard J. The Effect Of An Extended Warm-Up On Diurnal Performance Differences In Loaded Counter-Movement Jumps. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 1, 2010.

• 66 • Taylor K, Cronin JB, Gill N, Chapman DW, and Sheppard JM. Warm-up affects diurnal variation in power output. Int J Sports Med 32: 185-189, 2011.

• 67 • Temfemo A, Bishop D, Merzouk A, Gayda M, and Ahmaidi S. Effects of prior exercise on force-velocity test performance and quadriceps EMG. Int J Sports Med 27: 212-219, 2006.

• 68 • Timmons JA, Knudsen S, Rankinen T, Koch LG, Sarzynski M, Jensen T, Keller P, Scheele C, Vollaard NB, Nielsen S, Akerstrom T, MacDougald OA, Jansson E, Greenhaff PL, Tarnopolsky MA, van Loon LJ, Pedersen BK, Sundberg CJ, Wahlestedt C, Britton SL, and Bouchard C. Using molecular classification to predict gains in maximal aerobic capacity following endurance exercise training in humans. J Appl Physiol 108: 1487-1496, 2010.

• 69 • Tomaras EK and MacIntosh BR. Less is more: standard warm-up causes fatigue and less warm-up permits greater cycling power output. J Appl Physiol 111: 228-235, 2011.

• 70 • Vollaard NB, Constantin-Teodosiu D, Fredriksson K, Rooyackers O, Jansson E, Greenhaff PL, Timmons JA, and Sundberg CJ. Systematic analysis of adaptations in aerobic capacity and submaximal energy metabolism provides a unique insight into determinants of human aerobic performance. J Appl Physiol 106: 1479-1486, 2009.

• 71 • Wilson G. The development of maximal strength: Current and future training strategies. Strength Cond Coach 1: 3-7, 1993.

• 72 • Wilson GJ and Murphy AJ. The use of isometric tests of muscular function in athletic assessment. Sports Med 22: 19-37, 1996.

• 73 • Wilson GJ, Murphy AJ, and Walshe A. The specificity of strength training: the effect of posture. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 73: 346-352, 1996.

• 74 • Yue GH, Liu JZ, Siemionow V, Ranganathan VK, Ng TC, and Sahgal V. Brain activation during human finger extension and flexion movements. Brain research 856: 291-300, 2000.

• 75 • Zhang K, Pi-Sunyer FX, and Boozer CN. Improving energy expenditure estimation for physical activity. Med Sci Sports Exerc 36: 883-889, 2004.

• 76 • Zhang X, Dube TJ, and Esser KA. Working around the clock: circadian rhythms and skeletal muscle. J Appl Physiol 107: 1647-1654, 2009.

3

Comment développer son endurance spécifique ?

Sommaire

1 • Des filières énergétiques au métabolisme énergétique 69

La bioénergétique des activités physiques 70
Renouveler l'énergie de la contraction musculaire 71
Rôle de l'ATP dans le sarcomère 75
Pourquoi l'ATP est source d'énergie ? 76
Les filières énergétiques ou, de façon plus juste, le métabolisme énergétique 77
Système 1 : anaérobie alactique 78
Système 2 : anaérobie lactique 82
Système 3 : aérobie 94
Bilan des filières 102
Synthèse 103

Conclusion 109
Bibliographie 110
- *Ouvrages* *110*
- *Articles* *110*

Annexes 111

Annexe 1 : quelques bases de biochimie 111
- *Potentiel hydrogène de différentes solutions aqueuses* *111*

Annexe 2 : les phosphagènes 112
- *Les phosphagènes* *112*
- *Création de la phosphorylcréatine* *113*

2 • Apports de connaissances 115

Introduction 115
Définition(s) de "l'endurance" 115
Qu'est-ce qu'une bonne valeur de $\dot{V}O_2max$? 122
Effet de l'endurance, évaluation 124

L'optimisation de la performance, connaître les méthodes 140
Un développement de l'interval-training,
de l'intermittent, du fractionné 147
Construction d'une programmation, principe 159
Une aide à la recherche sur le marathon
ou les plus longues distances 169
Aux frontières de l'entraînement en endurance 174
Vision globale 190

Bibliographie 193

Nous avons volontairement scindé ce chapitre en 2 parties :

1 • Un apport de connaissances plus pointu sur une partie du métabolisme qui concerne le renouvellement de l'énergie de la contraction musculaire, ce que, dans les formations, nous nommons les fameuses filières énergétiques.

2 • Le développement de l'endurance.

Le lecteur peut passer cette première partie complexe, mais une lecture reste conseillée pour bien comprendre les méthodes développées ensuite. Un rapide coup d'œil des performances en endurance à garder en tête car le terrain offre souvent des moyens de comparer des chronos ou de se référer à une discipline en particulier

Disciplines	Hommes	Temps	Dates	Femmes	Temps	Dates
100 m	Usain Bolt	9''58	16/08/09	Florence Griffith-Joyner	10''49	16/07/88
200 m	Usain Bolt	19''19	20/08/09	Florence Griffith-Joyner	21''34	29/07/88
400 m	Michael Johnson	43''18	26/08/99	Marita Koch	47''60	06/10/85
800 m	David Lekuta Rudisha	1'40''91	09/08/12	Jarmila Kratochvilova	1'53''28	26/07/83
1 500 m	Hicham El Guerrouj	3'26'00	14/07/98	Yunxia Qu	3'50''46	11/09/93
3 000 m	Daniel Komen	7'20''67	01/09/96	Junxia Wang	8'06''11	13/09/93
5 000 m	Kenenisa Bekele	12'37''35	31/05/04	Tirunesh Dibara	14'11''15	06/06/08
10 000 m	Kenenisa Bekele	26'17''53	26/08/05	Junxia Wang	29'31''78	08/09/93
Semi-marathon	Zersenay Tadese	58'23	21/03/10	Mary Jepkosgei Keitany	1'05''50	18/02/11
Marathon	Patrick Makau Musyoki	2h03'38	25/09/11	Paula Radcliffe	2h15'25	13/04/03
100 km	Takahiro Sunado	6h13'33	21/06/98	Tomoe Abe	6h33'11	25/06/00
Triathlon	Andreas Raelert	7h41'33	2011	Chrissie Wellington	8h18'13	2011

1 • Des filières énergétiques au métabolisme énergétique

Nous sentons le besoin de faire un résumé avant la lecture de ce chapitre qui est l'un des plus techniques du manuel. Il vous aidera à comprendre la grande direction offerte par cette partie scientifique et surtout biochimique. Si vous n'êtes pas à l'aise, vous pouvez chercher à la relire plus tard. Nous avons nous-mêmes mis plusieurs années à le maîtriser et continuons à l'alimenter et le modifier à partir des travaux les plus récents.

Résumé :

Les filières énergétiques sont une association de réactions biochimiques faisant partie du métabolisme énergétique bien plus complexe que nos "croyances" scientifico-empiriques.
L'oxygène est finalement toujours présent. "L'anaérobie alactique" ne doit sa survie dans le temps qu'à la présence du renouvellement de la phosphorylcréatine (encore appelée créatine phosphate), cette dernière ne pouvant être renouvelée sans la mise à profit de l'activité des mitochondries, donc de l'utilisation de l'oxygène.
L'inverse est également "surprenant" : L'ATP produit par les mitochondries ne pourra atteindre les sarcomères que par le transport des navettes créatinekinase-phosphorylcréatine. La glycolyse est indispensable au cycle de Krebs. **Cela nous démontre le lien direct entre ces "filières"**.
Nous constatons qu'un effort maximal de 10 secondes utilise de l'oxygène et certaines études démontrent une utilisation très précoce de ce dernier. Il y a toujours présence d'oxygène, l'anaérobie pure a peu de place dans le vivant.
Enfin, le lactate n'est pas le déchet de la glycolyse, comme on l'entend dire si souvent. Au contraire : c'est sa création qui permet à la glycolyse de se maintenir. Plusieurs études démontrent qu'il aurait un effet protecteur sur la cellule (notamment antioxydant). Nous sommes bien loin des idées véhiculées dans l'entraînement sportif.
La compréhension de nos méthodologies d'entraînement passe souvent par nos enseignements "classiques" (pour ne pas dire anciens) des

"filières énergétiques". Nous les apprenons et nous cherchons parfois à en déduire des principes de terrain. Parfois nous faisons l'inverse : nous avons l'impression de comprendre pourquoi nos athlètes ont tels comportements en extrapolant sur des mécanismes énergétiques.
La réalité nous montre qu'il faut être prudent dans ces différentes extrapolations sous peine de passer à côté de données importantes pour comprendre l'adaptation du corps aux contraintes imposées par l'entraînement et, de fait, élaborer des méthodes et/ou des séances à même d'en améliorer le fonctionnement.

> *La théorie et la pratique, c'est pareil... en théorie !*
> *Source inconnue*

La bioénergétique des activités physiques

La bioénergétique s'intéresse au transfert d'énergie qui se déroule pendant le métabolisme énergétique. Ce denier est l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent dans une cellule vivante pour croître, s'entretenir ou faire un travail. C'est également l'ensemble des réactions d'anabolisme (construction) et de catabolisme (destruction).

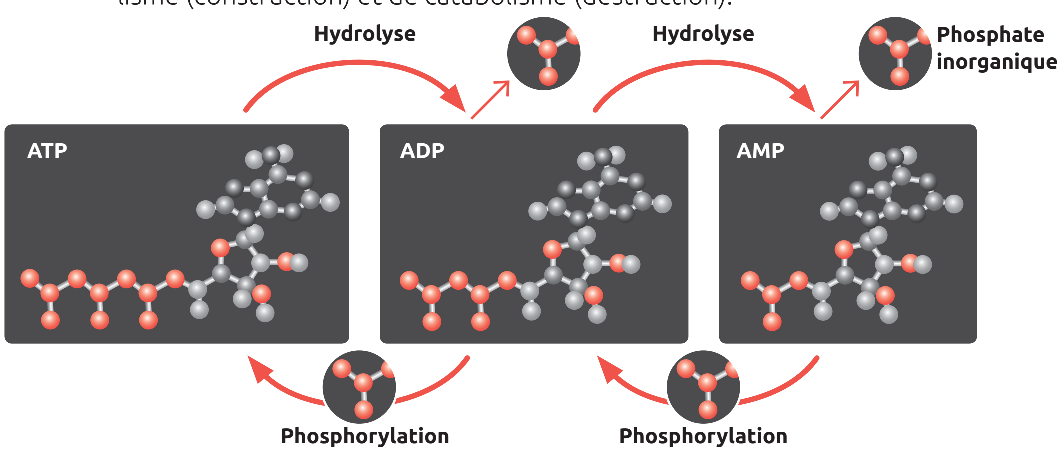


Figure 1 : Un exemple de catabolisme par hydrolyse (détruire par l'eau) et d'anabolisme par phosphorylation (ajouter un phosphate) de l'ATP en ADP puis AMP. Les phosporylations peuvent être non oxydatives (anaérobie) ou oxydatives (aérobie).

Une molécule est au centre de ce système car elle constitue la seule forme d'énergie utilisable par les molécules contractiles du muscle : ***l'adénosine triphosphate*** ou, de son petit nom, ***ATP***.

Il est fréquent de parler des filières énergétiques et d'en citer trois. Or, la réalité nous démontre qu'elles fonctionnent toutes en même temps et qu'***il n'existe pas uniquement trois manières de renouveler l'ATP (que nous citerons plus loin sans pouvoir toutes les développer).***

Ce domaine est peut-être celui où circulent le plus d'informations qui ne sont pas toujours très fiables et qui faussent la compréhension de l'entraînement. ***L'exemple le plus frappant étant que l'acide lactique est le frein de l'effort.***

Beaucoup de sportifs entendent parler "d'acide lactique" et le considèrent comme le facteur limitant de l'effort. Or, il n'en est rien à notre connaissance. Nombre d'entraîneurs fondent leur méthode sur la notion de seuil anaérobie alors qu'elle n'est plus aussi évidente dès qu'on la confronte à un protocole expérimental.

Comprendre les bases de la bioénergétique, c'est comprendre son intérêt et se dire que nous ciblerons difficilement une réaction isolée, mais un ensemble de réactions avec parfois une dominante.

Renouveler l'énergie de la contraction musculaire / hydrolyse de l'ATP

Quels sont les objectifs de l'entraînement ?

- être capable d'effectuer plusieurs répétitions d'un geste ou d'une action que nous avons trouvé efficace ;
- être endurant à une certaine valeur de la force ;
- faire en sorte que nous puissions continuer nos mouvements à forte intensité ;
- renouveler l'Adénosine Triphosphate de la contraction musculaire.

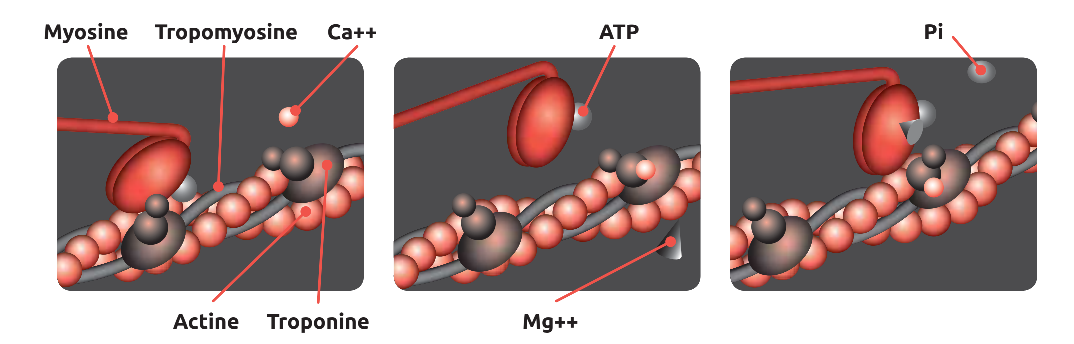


Figure 2 : Rôle de l'ATP dans la contraction musculaire. Robert Sabbadini et Jeff Sale, 1997 – Extrait tiré de l'animation basée en partie sur Color Atlas of physiology, A. Despopoulos et S. Silbernagl, Thieme Medical Publishers, 1991, New York.

La figure 2 montre l'importance du magnésium, du calcium et de l'ATP dans la génération de la tension entre l'actine et la myosine à l'origine de la force musculaire.

Etape 1 : le calcium (dernier messager de l'information nerveuse) se fixe sur l'actine et libère le site où s'accrochent les têtes de myosine permettant la liaison actine-myosine.

Etape 2 : à ce stade, l'ATP possède deux fonctions : la première est d'apporter de l'énergie afin de libérer la tête de myosine de l'actine ; une fois la tête libérée, elle peut se fixer plus loin sur un autre site que vient de libérer le calcium. Une fois en contact du site, l'ATP qui le lie au magnésium va réagir avec les enzymes présents sur le site afin d'établir sa deuxième fonction : faire basculer les têtes de myosine afin de tracter l'actine.

Etape 3 : la réaction brise la molécule d'ATP, un morceau se détache comme un bouchon que l'on extrait d'un stylo. Cette partie ou phosphate inorganique (Pi) laisse sur place la plus grosse partie qui se nomme ADP (adénosine diphosphate, ADP + PI = ATP). L'ADP est plus courte et s'attache différemment au contact des parois qui l'entourent. Plus petite que l'ATP, elle attire les parois vers elle. Cette réaction chimique permet un mouvement mécanique. Il faut qu'une nouvelle molécule d'ATP se fixe sur la tête de myosine pour qu'elle puisse se détacher (3e fonction). Dans le cas contraire, une rigidité s'installe comme celle d'un cadavre (vigor mortis).

Comme le moteur à explosion, l'hydrolyse de l'ATP (destruction par l'eau) transforme une réaction chimique en mouvement mécanique.

En partant d'une idée originale du physiologiste de l'exercice Jean-René Lacour (Communication personnelle, Université de Bordeaux, 2003) et en l'adaptant, nous présenterons les schémas qui constituent, selon nous, la meilleure façon de comprendre le métabolisme d'une façon à la fois globale et spécifique (figure 3) que nous avons déjà présenté par ailleurs (Reiss, 2013).
Ci-dessous, un rectangle représentant une cellule ou fibre musculaire possédant une mitochondrie (sur la droite) et les sarcomères (à gauche) où siègent la contraction musculaire utilisant l'ATP (c'est-à-dire la création d'une tension grâce aux ponts d'union ou accrochages entre les myofilaments d'actine et de myosine). La fibre musculaire renferme un liquide appelé cytosol qui contient un très grand nombre d'enzymes[16].

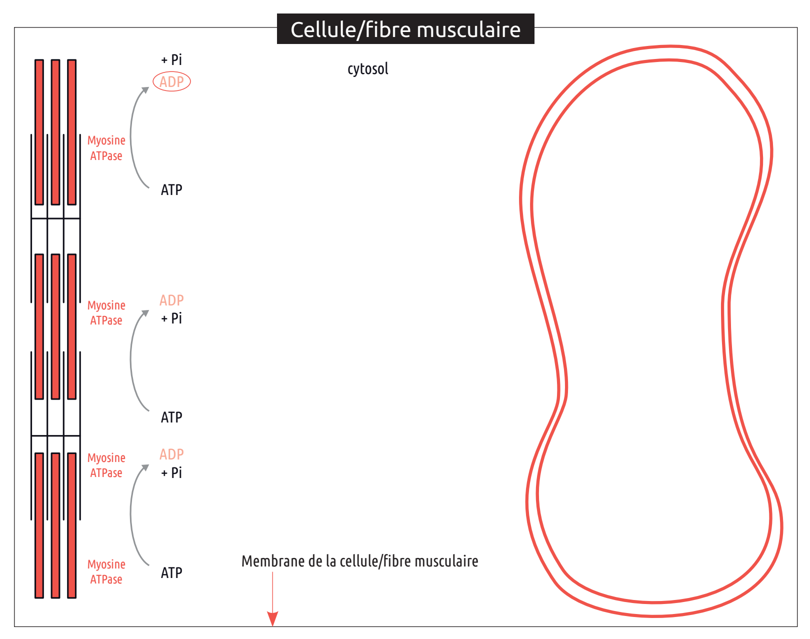


Figure 3 : Hydrolyse de l'ATP. Ce phénomène se fait au niveau de la tête de myosine car elle contient l'enzyme (myosine ATPase) permettant la gestion de cette réaction transformant l'énergie chimique en énergie mécanique. Seule cette molécule permet d'obtenir cette conversion. Il en résulte la formation d'ADP et de Pi.

16 / Enzyme : protéine jouant un rôle facilitateur dans une réaction chimique, ou catalyseur.

La réaction simplifiée est :

$$ATP => ADP + Pi \quad [1]$$

Pourtant, la réaction plus complète permet déjà d'anticiper ce qui va suivre concernant la notion d'acidose et de mieux comprendre la suite de nos explications sur le métabolisme :

$$Mg.ATP^{4-} + H_2O \xleftrightarrow{ATPase} MgADP^{3-} + HPO_4^{2-} + H^+ \quad [2]$$

Un premier constat : la contraction musculaire est une réaction acidifiante car elle libère des ions hydrogènes (H+). En effet, il est démontré qu'une solution est d'autant plus acide qu'elle contient des H+ (notion de pH ou potentiel hydrogène ; cf. annexe 1 en fin de première partie).
Ensuite, on voit que le magnésium (Mg) permet de transporter des molécules contenant du phosphate (P). Un premier lien avec la nutrition...
Enfin, on constate que celle-ci fait intervenir l'eau contenue dans la cellule d'où le nom d'hydrolyse. Ce mécanisme pourrait être assimilé à celui que l'on utilise dans une centrale nucléaire. On bombarde un gros atome pour le casser et libérer l'énergie contenue dans les liaisons grâce à la fission liée au choc des particules qui sont envoyées dessus (figure 4).

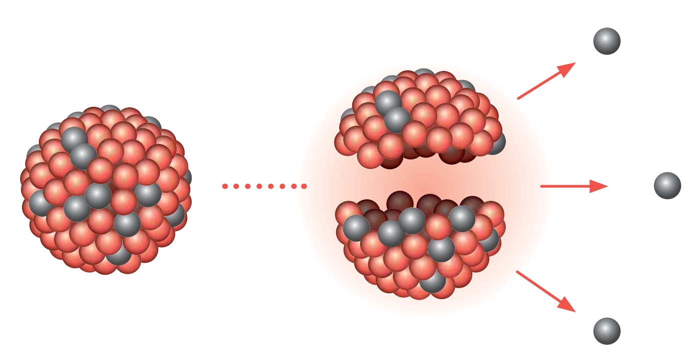


Figure 4 : Réaction nucléaire cassant un atome d'uranium et libérant de l'énergie par radiation et chaleur. Dans nos cellules, ce sont les enzymes (protéines spécialisées) qui se chargent de ce travail qui, dans certains cas, peut être réversible.

Rôle de l'ATP dans le sarcomère

L'ATP est constituée de trois types de molécules : adénine, ribose et groupements phosphate.

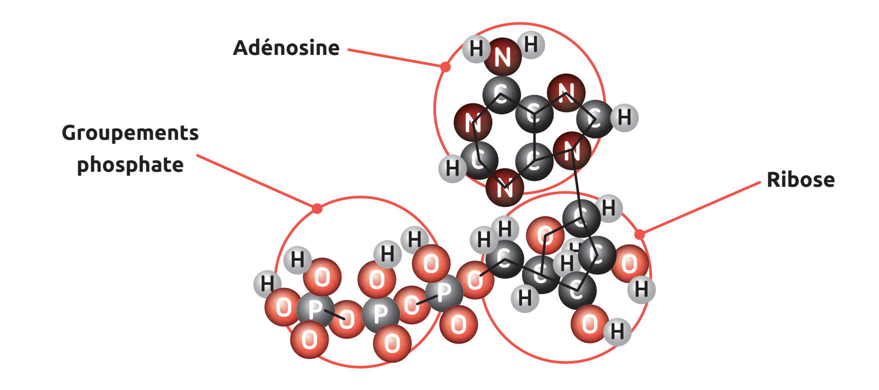


Figure 5 : La molécule d'ATP composée de trois parties : adénosine, ribose, groupements phosphate

Elle possède deux des molécules constituant l'ADN (acide désoxyribonucléique) enfermant notre capital génétique dans le noyau de nos cellules. L'ATP est très soluble dans l'eau et assez stable dans des solutions avec un pH compris entre 6.8 et 7.4.

Le coenzyme ATP est une molécule chimique favorisant les réactions du métabolisme via la libération de l'énergie (par hydrolyse) contenue dans l'une de ses liaisons phosphate. On dit "co-enzyme" car il faut une réaction inverse, elle-même sous le contrôle d'un enzyme, pour qu'il puisse le récupérer (par phosphorylation).

Par conséquent, comme l'ATP joue toujours le rôle de donneur d'énergie par hydrolyse d'une de ses liaisons riches en énergie dans les réactions enzymatiques auxquelles il participe. C'est pourquoi il est essentiel de le re-synthétiser en permanence.

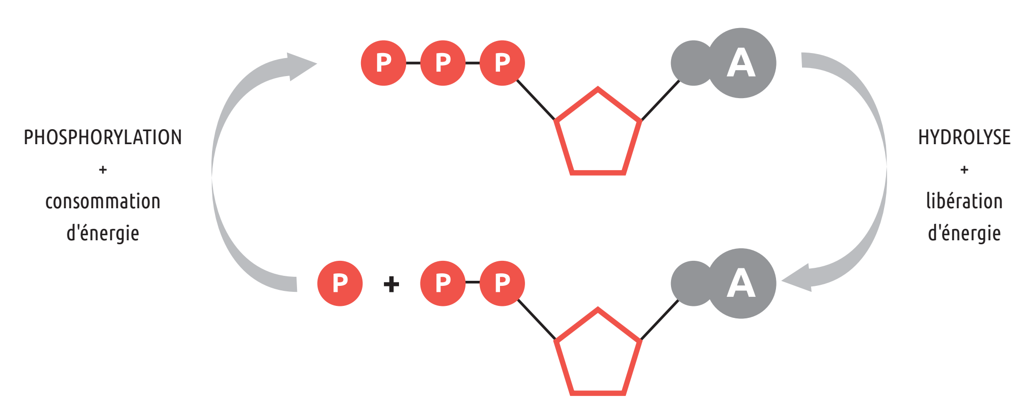


Figure 6 : La réaction centrale du métabolisme énergétique de la cellule musculaire.

Souvent, on décrit son fonctionnement comme celui d'une batterie qui se décharge et se recharge en permanence en fonction des besoins énergétiques de la cellule. Plus elle doit travailler, plus l'ATP est consommée et doit en contrepartie être reformée. Et les formes de travail cellulaire sont très nombreuses. Pensez simplement à la contraction musculaire, à la digestion des aliments, au maintien de la température corporelle, au maintien de la différence de concentration des diverses molécules de part et d'autre de la membrane de nos cellules, la synthèse des hormones, la création de l'influx nerveux... La lumière des verts luisants est due aussi à l'ATP...

Pourquoi l'ATP est source d'énergie ?

Nous ne mangeons pas de l'ATP à proprement parler. Nous consommons toutes sortes d'aliments (pâtes, viandes, etc.) pour apporter de l'énergie à nos muscles. Or, au microscope, nous ne voyons pas des spaghettis sur les têtes de myosine où se déroule la réaction permettant de produire une tension musculaire mais bien de l'ATP. Cependant, il n'est pas intéressant de stocker l'énergie sous forme d'ATP car son poids moléculaire est trop élevé pour la quantité d'énergie qu'il enferme et que l'on peut utiliser. Il est bien plus intéressant de stocker l'énergie sous la forme de molécules où le rapport "poids moléculaire/énergie utilisable" est plus rentable comme la phosphorylcréatine, le glycogène ou les acides gras.

Les filières énergétiques ou, de façon plus juste, le métabolisme énergétique

Pour ce qui nous concerne, la principale raison expliquant la resynthèse permanente de l'ATP est que la tête de myosine ne peut utiliser QUE cette molécule pour s'attacher (et se détacher) à l'actine et produire ainsi la tension musculaire à l'origine de la production de force sous toutes ses formes. Nous avons l'habitude d'entendre qu'il existe 3 filières énergétiques principales. Plusieurs appellations ont été données au cours des dernières années.

Système 1 : Anaérobie alactique ou Pool des phosphagènes, la phosphorylation.

Système 2 : Anaérobie lactique ou glycolyse anaérobie lactique ou glycolyse anaérobie ou glycolyse ou voie d'Embden-Meyerhof... La glycolyse par définition ne peut être qu'anaérobie (la glycolyse est l'étape permettant de passer du glucose au pyruvate d'après Moussard (2006)). L'utilisation de l'adjectif "oxydative" fait référence au fait que l'on utilise un autre type de transporteur (co-enzyme) pour soustraire l'énergie enfermée dans le glucose. Au final, la réaction se déroule qu'il y ait ou non de l'oxygène. Il ne faut pas confondre "oxydation" et "utilisation de l'oxygène" (voir la figure 11 page 85 illustrant cette notion).

Système 3 : Aérobie, glycolyse aérobie, voie oxydative, cycle de Krebs, oxydation phosphorylante,...

Les réactions se font dans le liquide enfermé dans la cellule musculaire ou cytosol (système 1 et 2) et dans les mitochondries (système 3).
La mitochondrie (mitos = trame ; chondrion = petit grumeau) est spécialisée dans la production d'ATP mais possède également d'autres fonctions. Ce sont de véritables centrales énergétiques pour la cellule compte tenu de leur rendement, comme nous le verrons plus loin. Les cellules musculaires et hépatiques contiennent beaucoup de mitochondries. Elles peuvent se diviser (ou mourir) en fonction des besoins de la cellule. Leur membrane

interne est plissée afin d'en augmenter la surface où se déroulent les nombreuses réactions chimiques de la respiration cellulaire.

Pour en savoir plus :

Il y a des milliards d'années... La mitochondrie est une ancienne bactérie spécialisée dans l'utilisation de l'oxygène qui a fusionné avec une ancienne bactérie anaérobie. L'oxygène est agressif et toxique, et bien que nos cellules aujourd'hui aient des transporteurs à oxygène pour canaliser ce dernier, lorsqu'il ne va pas au bon endroit, il provoque des dégâts. C'est pour cela que nous devons avoir des antioxydants. De cette symbiose préhistorique sont nées les cellules que nous possédons tous dans le règne animal. La mitochondrie a tout de même gardé quelques traces de son ancienne autonomie comme des gènes pas tout à fait identiques à son hôte. Votre ADN est légèrement différent dans votre mitochondrie, on parle de l'ADN mitochondriale transmis par votre maman.

Système 1 : l'anaérobie alactique

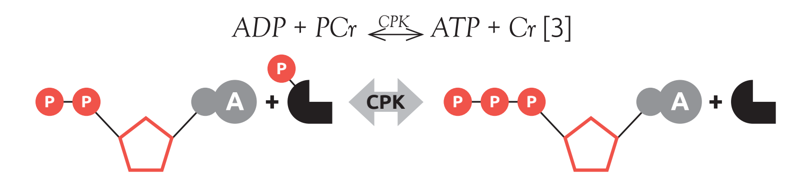
La phosphorylcréatine

Dès que le muscle entre en activité (quel que soit son niveau d'intensité à vrai dire), la concentration en ATP diminue.
Pour faire face à cette diminution, il existe un mécanisme de resynthèse de l'ATP qui utilise un composé riche en énergie : bien qu'appelée la créatine phosphate (CP), son véritable nom biochimique est la ***PhosphorylCréatine (PCr)***. Elle représente une source d'énergie potentielle disponible immédiatement pour permettre la resynthèse de l'ATP. La dégradation d'une molécule de PCr libère la quantité d'énergie suffisante pour permettre la resynthèse d'une molécule d'ATP.

Une enzyme, la ***créatine phosphokinase*** (CPK), permet de récupérer la partie phosphate de la phosphorylcréatine et de ***fixer ce phosphate à l'adénosine di-phosphate (ADP)*** pour reformer de l'ATP.

La réaction s'écrit :

$$ADP + PCr \overset{CPK}{\rightleftarrows} ATP + Cr \ [3]$$



L'ADP

La synthèse de l'ATP peut également avoir lieu avec 2 molécules d'ADP. Cette réaction s'effectue en présence de l'enzyme myokinase (MK) et forme une molécule d'ATP (3 phosphates) et une molécule d'AMP (1 phosphate). Cette réaction est souvent appelée "réaction myokinase". L'enzyme myokinase est précurseur également de la glycolyse anaérobie.

La réaction s'écrit :

$$ADP + ADP \overset{MK}{\rightleftarrows} ATP + AMP \ [4]$$

Mais les réserves en PCr sont faibles et s'épuisent rapidement. Ce processus ne peut se maintenir longtemps.

Bilan du système "anaérobie alactique" :

- un délai d'intervention ou temps de latence presque nul, et qui intervient quel que soit le niveau de l'intensité du travail musculaire ; c'est le premier rempart pour prévenir la chute d'ATP ;
- une puissance très élevée, de l'ordre de 100 kcal/min en moyenne, sachant que la valeur peut presque doubler chez le sportif entraîné ;
- puissance (revue à la baisse) : 3 à 5 secondes ;
- capacité : 30 secondes ;

• le facteur limitant de cette filière est l'épuisement des réserves en phosphagène (PCr). Les sports qui nécessitent de la force ou de la puissance comme l'athlétisme ou l'haltérophilie sollicitent ce type de filière, les exercices de musculation en série courte également. Une action explosive lors d'un match demande la disponibilité de cette partie du métabolisme.

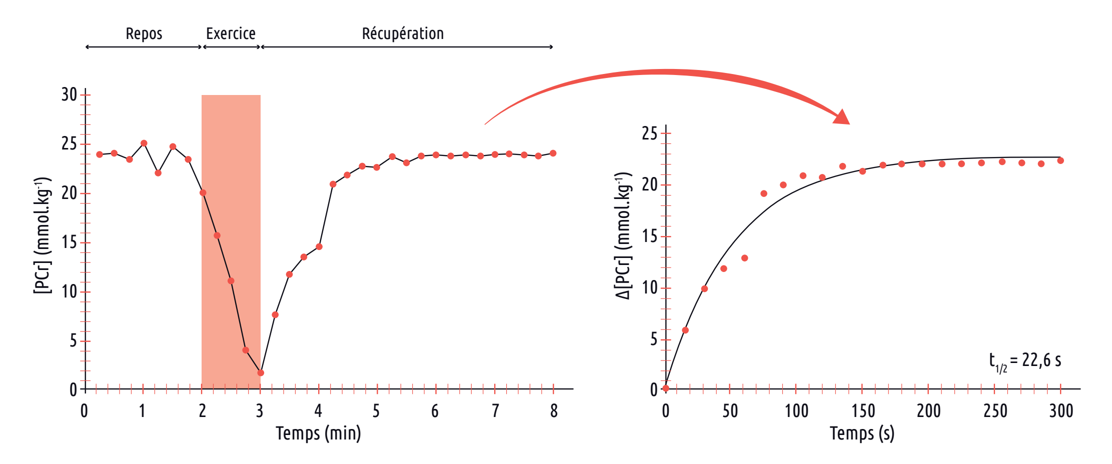


Figure 7 : Évolution typique de la PCr après un exercice consistant en 50 flexions plantaires à 70 % de la 1RM pendant 1 min, suivi d'une récupération de 5 min (Francaux et coll. 1999, 2000). L'analyse (cartouche à droite) de la réplétion de PCr montre que la moitié du stock est resynthétisé en moins de 30 s. Ce délai peut varier avec l'intensité et la nature de l'exercice. La supplémentation n'a aucun impact sur cette vitesse de resynthèse, elle peut tout au plus augmenter sous certaines conditions le stock intramusculaire de PCr.

Pour aller plus loin :

En réalité, cette filière porte mal son nom. Dire qu'elle fonctionne sans oxygène est erroné. Même si l'on ne voit pas la présence d'O_2 dans les réactions, il faut savoir qu'un muscle sous occlusion ne peut synthétiser la PCr (Harris et coll., 1976 ; Figure 8), preuve que l'énergie issue de la mitochondrie (organite aérobie par excellence) est essentielle à ce processus. En effet, l'occlusion (garrot) empêche d'approvisionner les muscles en sang riche en oxygène pour alimenter les mitochondries qui en ont besoin pour générer de l'ATP.

Autre particularité de cette phosphorylation de la créatine, puis de l'ADP pour obtenir de l'ATP : elle est consommatrice d'ions hydrogène :

$$MgADP^{3-} + PCr^{2-} + H^{+} \longleftrightarrow MgATP^{4-} + Cr \ [5]$$

Cette réaction réduit donc le pH de la cellule musculaire en consommant des ions H+ tout en refaisant le stock d'ATP. Que du bonheur pour maintenir la contraction musculaire !

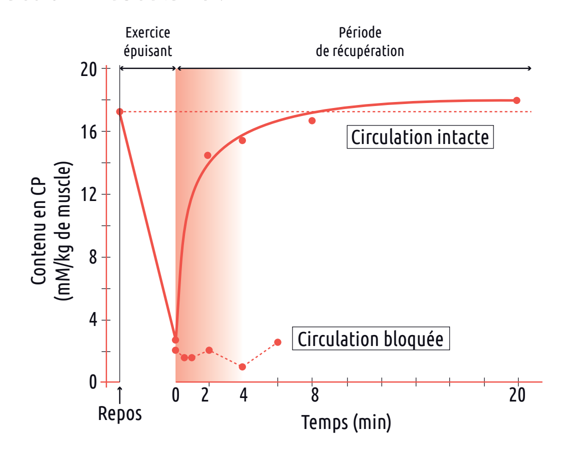


Figure 8 : Contraction musculaire en condition normale (sans occlusion) et bloquée (avec occlusion). Lors de l'occlusion, la synthèse de la PCr est impossible. Le sang qui approvisionne le muscle et ses mitochondries en oxygène permet à ces dernières de créer de l'ATP qui sera utilisée pour phosphoryler la créatine (d'après Harris et coll., 1976).

En résumé (figure 9) :

- Nous pouvons constater que les réserves de PCr permettent la resynthèse de l'ATP et libèrent de la créatine.
- La présence d'ADP en "surnombre" permet également une autre réaction renouvelant l'ATP en produisant de l'AMP.
- L'oxygène va permettre de phosphoryler la créatine pour créer à nouveau la PCr indispensable à cette partie du métabolisme. ***Plus le système aérobie sera performant, plus l'anaérobie alactique pourra s'exprimer.***

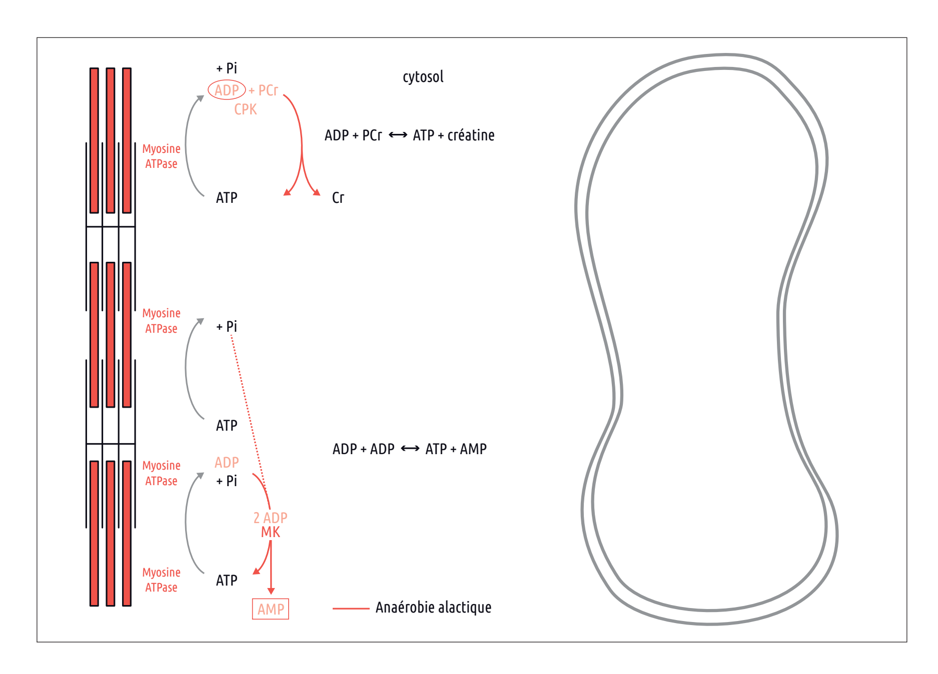


Figure 9 : Anaérobie alactique en un coup d'œil (REISS 2013)

Système 2 : anaérobie lactique

La dégradation du glycogène est appelée glycogénolyse et celle du glucose glycolyse. Il ne faut pas les confondre car la première est là pour aller piocher dans le stock des glucides afin de le mettre à la disposition des cellules où il sera métabolisé, alors que la seconde est la dégradation du glucose permettant de lui soutirer, grâce à des enzymes, l'énergie potentielle qu'il renferme (voir figure 10).

Dès le début de l'exercice, la glycolyse qui, jusque-là, tournait à bas régime, va augmenter. Sa sollicitation est favorisée par la présence de divers catabolites (comme l'ADP, voire l'AMP, mais surtout par la présence de calcium). Ceux-ci sont le résultat de l'hydrolyse de l'ATP. Ils vont activer des enzymes qui interviennent dans la dégradation du glycogène ou du glucose en pyruvate.

La dégradation d'une unité glycosyl n'a pas le même rendement selon le processus utilisé. La glycogénolyse produit 3 ATP alors que la glycolyse n'en synthétise que 2. Le gain de 1 ATP via la glycogénolyse est lié au fait que le glucose issu de la dégradation du glycogène est prêt à être utilisé dans la glycolyse moyennant une toute petite transformation. On dit qu'il est sous une forme énergétique "active" grâce à la présence d'un phosphate dans sa structure. Pour être utilisé dans la glygolyse, le glucose arrivant du sang et entrant dans la cellule musculaire, doit passer par une étape préliminaire visant justement à le mettre sous forme "active" grâce à l'adjonction d'un phosphate ; sans cette petite modification, il lui est impossible d'entrer dans le processus de dégradation de la glycolyse. Au final, cette consommation d'un ATP explique la différence observée dans le bilan net des deux réactions selon le point de départ utilisé (Figure 11).

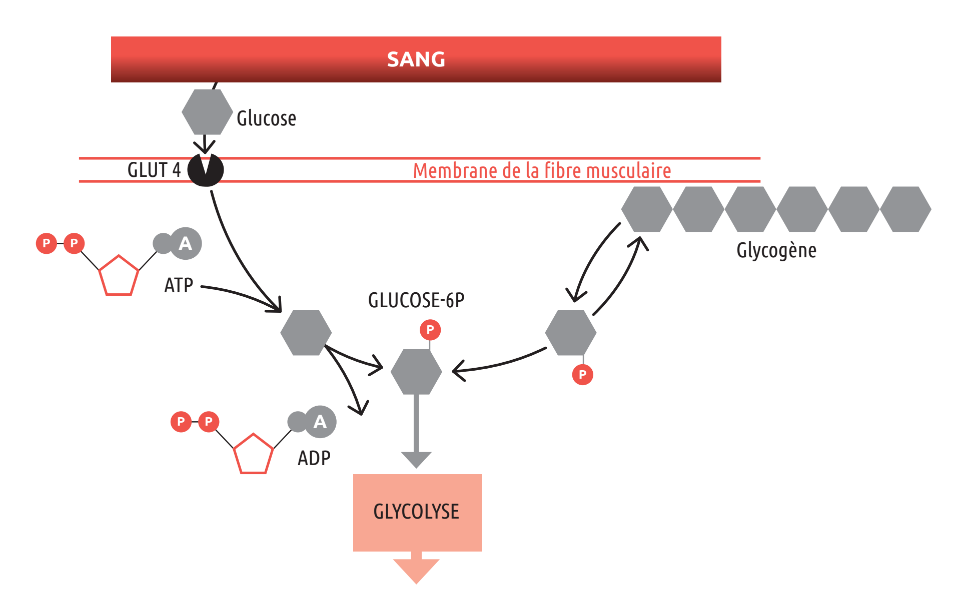


Figure 10 : Amorçage de la glycolyse. Le glycogène donne une forme active pouvant entrer directement dans le processus alors que le glucose a besoin d'être phosphorylé pour entrer dans la glycolyse sous la forme G6P (glucose avec un phosphate sur le 6e atome de carbone). La forme avec fournie par le glycogène donne un bonus de 1 ATP à la fin de la glycolyse par rapport au glucose.

Le NAD (ou Nicotinamide Adénine Dinucléotide) est indispensable au maintien de la glycolyse. Il est donc recyclé grâce à un phénomène appelé oxydo-réduction (ou "redox" pour les intimes). L'**oxydation** est la récupération des protons issus d'un donneur d'ions H+ (ici le glucose-6P perd ses ions H+) ; c'est donc une diminution de l'énergie contenue dans une molécule. La **réduction** est le transfert de ces mêmes protons à un accepteur d'ions H+. C'est donc une augmentation de l'énergie contenue dans une molécule. Grâce au processus redox, les ions H+ transportés d'une molécule à l'autre n'iront pas augmenter l'acidité intracellulaire par leur libération dans le cytosol de la fibre musculaire, et permettront surtout de ne pas dilapider l'énergie ainsi récupérée pour la véhiculer là où l'on en a le plus besoin. En d'autres termes, en récupérant les ions H+ du glucose, les NAD permettent de libérer une première partie de l'énergie contenue dans cette molécule ; une production de molécules d'ATP peut alors être obtenue. Une fois qu'ils les ont récupérés (oxydation), les NAD acheminent les ions H+ vers les mitochondries où ils seront utilisés (réduction) dans un processus que nous décrirons plus loin. Le NAD est alors à nouveau disponible pour récupérer les ions H+ issus de la dégradation d'une nouvelle molécule de glucose-6P. Ainsi, ***c'est grâce à l'oxydo-réduction des NAD que la glycolyse peut se poursuivre et produire des pyruvates, le produit final de la glycolyse*** (figure 11A). On voit déjà que ***le fonctionnement de la glycolyse (anaérobie) fournit de quoi alimenter une partie des processus qui se déroulent dans les mitochondries (aérobie).*** Il existe bel et bien une relation directe entre ces deux processus métaboliques.

Cependant, comme c'est souvent le cas dans les processus biologiques, il existe des limites de rendement à toute forme de travail cellulaire. Celui de la mitochondrie n'échappe pas à cette règle. Elle ne peut prendre en charge qu'un nombre limité de protons (H+) par seconde (ce nombre est fonction de la vitesse de travail des enzymes qu'elle enferme). Lorsque la glycolyse produit des pyruvates à une vitesse élevée face à la demande énergétique croissante et/ou urgente de la cellule musculaire, les NAD apportent à la mitochondrie de plus en plus de H+ issus de la glycolyse... et il arrive un moment où elle ne peut plus les absorber.

Si les NAD n'arrivent plus à les donner aux mitochondries, cela veut dire qu'ils ne peuvent plus revenir vers la glycolyse (navette NAD) pour lui permettre de continuer. Pour éviter que la glycolyse s'arrête, les NAD vont donner (oxydation) leurs H+ aux pyruvates issus de la dégradation du glucose pour former du lactate. Ainsi, quel que soit le substrat glycosyl utilisé (glycogène musculaire ou glucose sanguin), il y a formation de 2 molécules de lactates grâce aux pyruvates qui jouent le rôle d'accepteurs de proton. Grâce à ce transfert de H+ vers les pyruvates, les NAD peuvent retourner œuvrer dans les mécanismes de la glycolyse. Une nouvelle fois, nous sommes en présence d'un mécanisme évitant que ces protons ne s'accumulent dans la cellule musculaire et augmentent l'acidité intracellulaire (figure 11B).

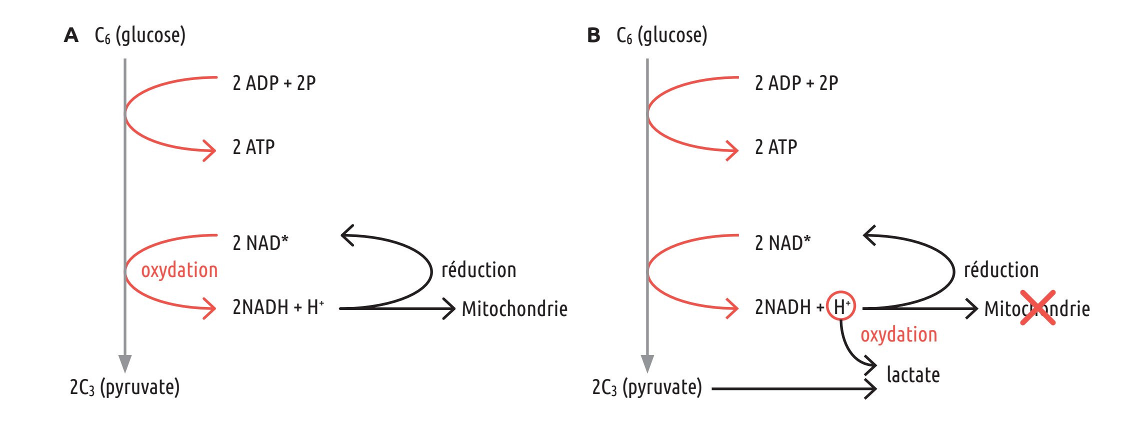


Figure 11 : La glycolyse peut se faire sous deux conditions : avec transfert ou non des ions H+ vers la mitochondrie (où ils seront utilisés pour produire des molécules d'ATP). Le NAD doit être recyclé en permanence en se séparant de ses H+ pour que la glycolyse puisse continuer. Ces ions H+ iront soit vers la mitochondrie, soit se fixeront sur le pyruvate pour former du lactate.

Première idée reçue :
LA GLYCOLYSE PRODUIRAIT DE L'ACIDE LACTIQUE.

Non seulement elle produit des pyruvates, mais le processus complet de la fermentation lactique qui se produit APRÈS la glycolyse (peut-être que

l'erreur vient de là) et qui permet d'empêcher les protons de s'accumuler, aboutit à la formation de lactates et non d'acide lactique.

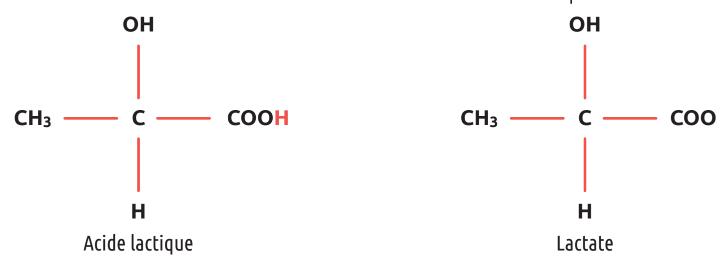


Figure 12 : Différences entre l'acide lactique et le lactate.

Cette réaction est alcalinisante et non acidifiante (Figure 13). En d'autres termes, elle augmente le pH ! (Rappelons ici que la diminution du pH est synonyme d'augmentation de l'acidité). Plus le pyruvate peut accepter les H+ du NAD, plus il y a production de lactate, et plus la glycolyse peut continuer à fonctionner.

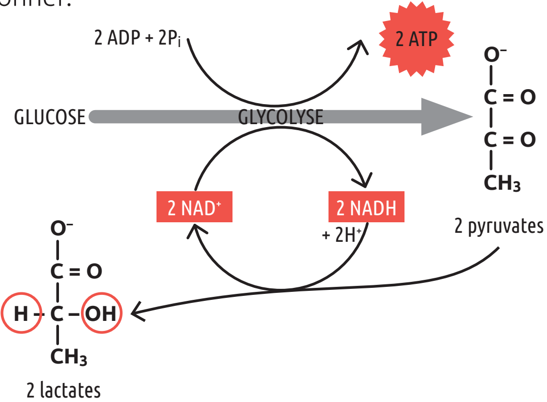


Figure 13 : La formation de lactate à partir du pyruvate permet de recycler le NAD et à la glycolyse de se poursuivre.

Plutôt que d'être le signe d'une limite à la performance, la production de lactates est le témoin de l'efficacité de la glycolyse, et de la capacité à repousser le moment où l'on devra arrêter l'exercice, c'est-à-dire le moment où l'acidose MÉTABOLIQUE (et non lactique) serait trop élevée pour que les enzymes puissent correctement travailler (Rosbergs et coll., 2004).

Pour le glucose, le bilan de la réaction s'écrit :

$$G6P + 2\ ADP + 2Pi + 2\ NAD^{+} \rightarrow 2\ Pyruvate + 2\ ATP + 2H_2O + 2NADH,H^{+}\ [6]$$

Pour le glycogène, un phosphate inorganique (Pi) est consommé, mais sans utiliser d'ATP. La glycolyse utilisera donc 1 ATP. Comme la glycolyse en renouvelle 4, au final, 3 molécules d'ATP sont resynthétisées. En partant, du glucose, 2 ATP vont être consommés et le bénéfice net sera de 2 molécules d'ATP.

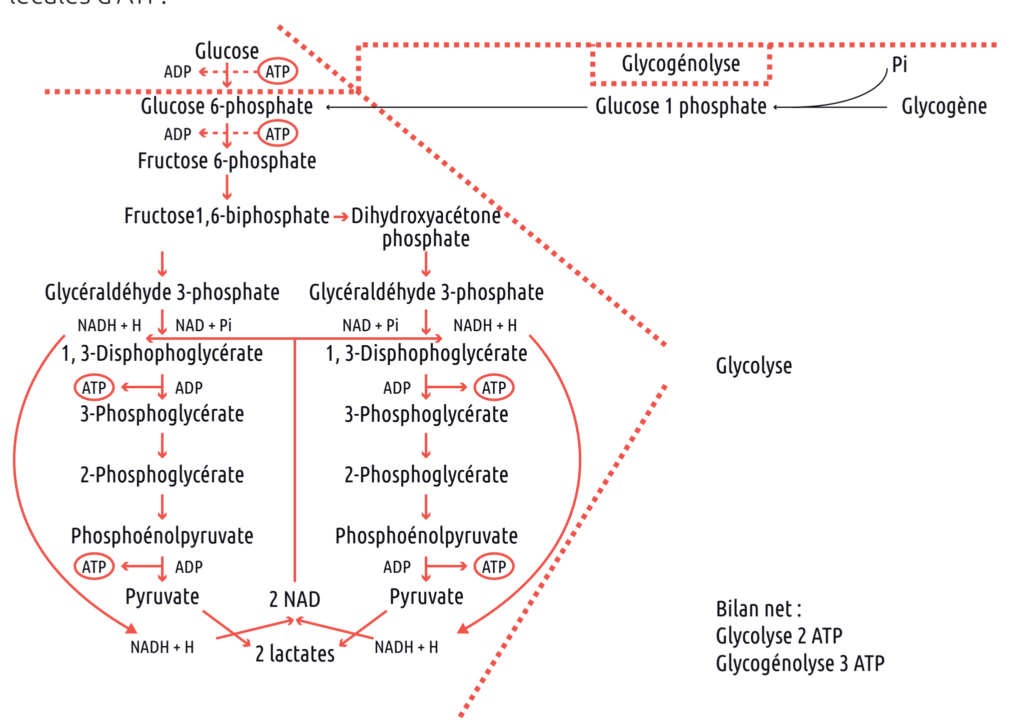


Figure 14 : Le détail des étapes de la glycolyse et la glycogénolyse (REISS, 2007).

Bilan du système "anaérobie lactique" :

- Un délai d'intervention assez rapide, efficace à partir de 10 s.
- Une puissance élevée.

- Puissance : 20-40 s.
- Capacité : 2 à 3 min.
- 3 ATP produit pour la réaction en partant du glycogène ou 2 en partant du glucose.
- Les facteurs limitants de cette filière sont, entre autres, le temps nécessaire à ce que l'O_2 arrive dans les mitochondries (inertie cardiaque, nombre de mitochondries...) et la quantité d'enzymes permettant le passage du pyruvate au lactate (lacticodéshydrogénase, LDH).

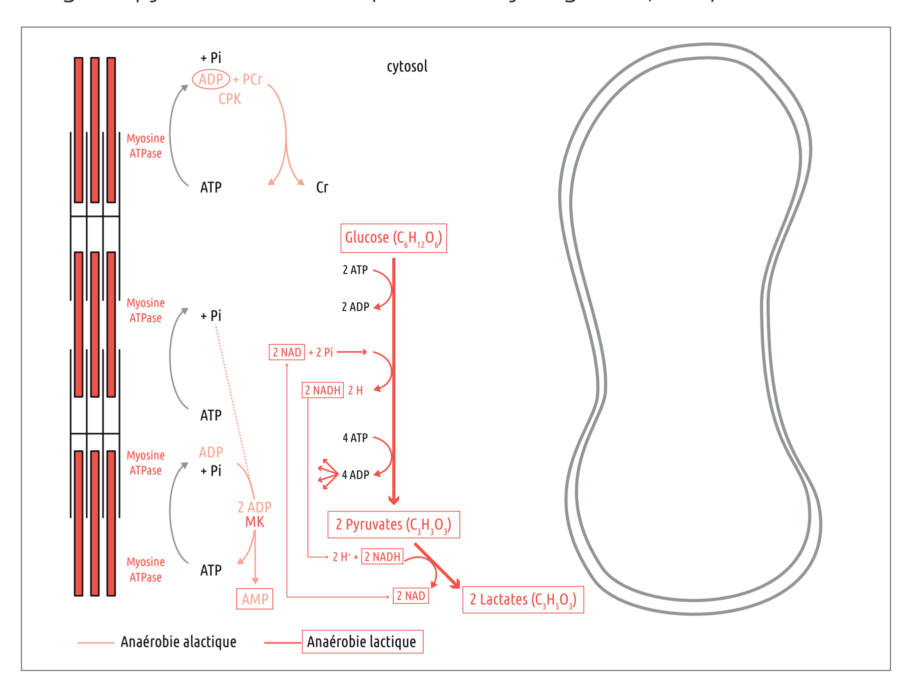


Figure 15 : La "filière anaérobie lactique" (REISS, 2013)

Pour aller plus loin sur cette filière et discuter du fameux lactate :

Lorsque nous parlons de "filière anaérobie lactique", cela veut dire qu'une partie du pyruvate ne va pas entrer dans la mitochondrie pour devenir le combustible qui fera intervenir l'oxygène comme ultime accepteur des H+ à la fin du processus de dégradation. Pour des efforts important qui né-

cessitent de l'énergie rapidement, elle financera la resynthèse de l'ATP par une "astuce" de l'évolution de la vie.
Le pyruvate joue le rôle d'accepteur d'hydrogène en se combinant avec l'ion H+ provenant du NAD pour donner du lactate, et non de l'acide lactique (celui-ci n'a pas la même composition chimique... même s'il en est proche, figure 12). Durant cette partie, il n'y a pas eu création d'acide lactique comme nous l'entendions, bien au contraire ! Cette réaction consomme un H+ alors que, par définition, un acide le libère. En revanche, cette action permet de renouveler le NAD qui est indispensable à notre glycolyse (le NAD est normalement renouvelé par la mitochondrie par les navettes glycérol-3-phosphate et par l'intermédiaire du flavine adénine nucléotide ou FAD, mais si l'oxygène n'arrive pas en quantité suffisante dans la cellule, ce processus n'est pas suffisant). La glycolyse libère de l'acidité si les NAD n'arrivent pas à les prendre en charge, mais pas le lactate.
Ainsi, le lactate n'est responsable que d'une chose : permettre à la glycolyse de continuer et faire le lien entre les processus dits anaérobie et aérobie. En effet, la réaction est réversible : le lactate peut redevenir du pyruvate, lui-même utilisé par la "filière aérobie". C'est ce qu'il fallait favoriser, lors de la récupération dite "active", afin d' "éliminer" les lactates. Mais, au vu de nos connaissances actuelles sur les lactates, est-ce si judicieux ? Ne faudrait-il pas mieux parler de recyclage du lactate plutôt que d'élimination ?

Récupération active ou passive ?

Retour à la lactatémie basale	Récupération passive	Récupération active (50 à 60 % de $\dot{V}O_2max$)
50 %	25 min	6 min
75 %	50 min	12 min
100 %	1h30	20 min

La récupération active ne se justifie pas selon l'idée qui se cache derrière ; en l'occurrence, ici, si l'activité physique a vu la concentration en lactate baisser, c'est simplement une conséquence de sa consommation. Or, la non consommation aurait permis de reconstruire de l'énergie via le foie par exemple. Le lactate est un "combustible" ! (Pour le puriste de la chimie, il n'y a pas de combustion dans le corps, sinon on brûlerait de l'intérieur.)

Récupération passive versus récupération active
(source primaire sur le site savoir-sport.org)

Un joueur de basketball effectue parfois 100 périodes de jeu intense (2 à 6 secondes).
Une action toutes les 21 secondes.
Comme en football, c'est la capacité à récupérer entre les efforts qui va faire la différence en fin de match.
Déjà, d'autres études en cyclisme, natation et en course à pied démontrent que de la récupération active entre les périodes d'exercice supramaximal résulte une moins bonne performance que la récupération passive.
Une étude en particulier compare les modes de récupération active et passive :

- 16 joueurs de basketball de sexe masculin
- âge = 16,8 ± 1,2 ans
- V̇O_2max = 59,5 ± 7,9 ml/kg/min

Les sportifs ont exécuté 10 sprints de 30 mètres avec 30 secondes de récupération passive entre chaque sprint. Lors de la même séance, les sportifs ont aussi exécuté 10 sprints de 30 mètres avec récupération active (course à pied à 50 % de leur vitesse aérobie maximale).
À deux occasions, ces deux protocoles ont été répétés, en ordre aléatoire.

Résultats : Les sportifs sont significativement plus fatigués après avoir effectué des sprints avec récupération active qu'avec récupération passive. La récupération active augmente ainsi la sollicitation de l'organisme si on se place d'un point de vue global. Nous aimons souvent insister sur le fait que le meilleur entraîneur est celui qui sait le mieux gérer la récupération par rapport aux objectifs fixés. Nous en avons la démonstration avec ces études.

Le devenir du lactate

La différence entre acide lactique et lactate est liée à l'origine des réactions. Comme nous l'avons déjà dit, les réactions vont créer une forme ionique et non acide ; pour les plus spécialistes, suivez les réactions ci-contre.

α-D-Glucose + $ATP^{4-} \rightleftharpoons$ glucose-6-phosphate^{2-} + ADP^{3-} + H^+

Glucose-6-phosphate$^{2-} \rightleftharpoons$ fructose-6-phosphate^{2-}
Fructose-6-phosphate^{2-} + $ATP^{4-} \rightleftharpoons$ fructose-1,6biphosphate^{4-} + ADP^{3-} + H^+
Fructose-1,6biphosphate$^{4-} \rightleftharpoons$ dihydroxyacetone-P^{2-} + glyceraldehyde-3-P^{2-}
Dihydroxyacetone-$P^{2-} \rightleftharpoons$ glyceraldehyde-3-P^{2-}
Glyceraldehyde-3-P^{2-} + P_1^{2-} + $NAD^+ \rightleftharpoons$ 1,3-bisphosphoglycerate^{4-} + NADH + H^+
1,3-bisphosphoglycerate^{4-} + $ADP^{3-} \rightleftharpoons$ 3-P-glycerate^{3-} + ATP^{4-}
3-phosphoglycerate$^{3-} \rightleftharpoons$ 2-phosphoglycerate^{3-}
2-phosphoglycerate$^{3-} \rightleftharpoons$ phosphoenolpyruvate^{3-} + H_2O
Phosphoenolpyruvate^{3-} + ADP^{3-} + $H^+ \rightleftharpoons$ pyruvate$^-$ + ATP^{4-}
Pyruvate$^-$ + NADH + $H^+ \rightleftharpoons$ lactate$^-$ + NAD^+
$C_3H_3O_3^- + C_{21}H_{29}N_7O_{14}P_2 + H^+ \rightleftharpoons C_3H_5O_3^- + C_{21}H_{28}N_7O_{14}P_2^+$

La forme finale est bien du lactate et non de l'acide lactique.

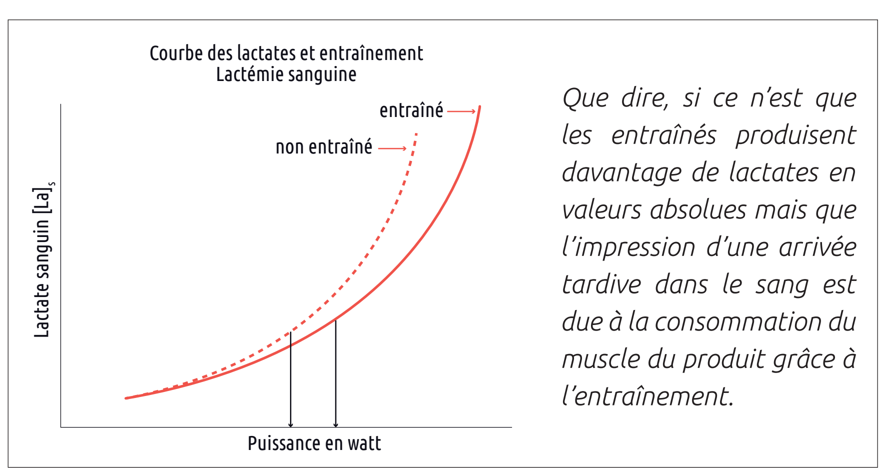
Nos lactates ne sont ni responsables des courbatures ni des crampes (Cazorla et coll., 2001). Certaines études laissent à penser qu'ils protégeraient de la fatigue. En effet, le lactate est un ion qui capturerait les ions potassium et permettrait à la membrane musculaire d'être moins perturbée au moment du signal nerveux (Nielsen et coll., 2001). D'autres études montrent chez l'animal qu'une injection de lactate intramusculaire permet de recouvrer la force immédiatement. Encore plus surprenant : il aurait un effet antioxydant selon des travaux publiés récemment. Pas mal pour une molécule censée limiter la performance !

Au cours d'un 400 mètres (par exemple), le lactate (C3H5O3-) produit s'accumule dans le cytosol cellulaire (milieu liquidien à l'intérieur des cellules mais extérieur aux organites cellulaires). Sa destinée est multiple :
- le cœur (il en utilise 15 % versus 60 % d'acides gras) ;
- le cerveau (très friand et équipé d'une pompe spéciale pour le capter) ;
- les muscles (via les mitochondries) ;
- le foie (cycle de Cori, reconstitution des réserves de glycogène à partir de 2 lactates) ;

- les fibres ST (lentes) consomment les lactates ;
- les mitochondries les consomment en direct via des transporteurs MCT4 (monocarboxilate transporteur) ;
- des traces sont possibles dans l'urine ou la sueur comme beaucoup d'autres molécules produites en abondance.

Le lactate ne peut plus être considéré comme un déchet. C'est un métabolite intermédiaire encore riche en énergie potentielle. Cette énergie est essentiellement utilisée lors de la synthèse de nouvelles molécules d'ATP, par plusieurs étapes de la néoglucogenèse et à la reconstruction des réserves en glycogène de l'organisme.
Gardons en tête ce que Lacour avait déjà démontré dans les années 90 : "mes plus grands producteurs de lactate ont la meilleure performance au 400 m". La lactatémie (ou concentration du lactate dans le sang), souvent utilisée pour apprécier l'intensité d'exercice chez le sportif, n'est que le reflet indirect et très incomplet du lactate produit par le muscle. Il est à noter que l'entraînement permet de consommer les lactates plus rapidement dans le muscle, cela donne l'impression qu'il y en a moins dans le sang (voir figure suivante).

L'apparition plus tardive des lactates dans le sang est due à l'absorption plus importante du lactate par les mitochondries.



Que dire, si ce n'est que les entraînés produisent davantage de lactates en valeurs absolues mais que l'impression d'une arrivée tardive dans le sang est due à la consommation du muscle du produit grâce à l'entraînement.

Transfert et oxydation du lactate cytoplasmique dans la mitochondrie. D'après BROOKS, 1999 (modifié).

L'entraînement permet d'utiliser directement le lactate dans la mitochondrie et d'en extraire l'énergie pour renouveler de l'ATP.

En théorie :
- la baisse du pH (6.5 sur l'échelle) perturbe les enzymes de la glycolyse ;
- les ions oxonium (anciennement hydronium ; H+) entreraient en compétition avec le calcium dans le sarcomère ;
- il en résulte une baisse de force isométrique, et ;
- une baisse de la vitesse maximale de raccourcissement du sarcomère.

Beaucoup d'affirmations ont été démontrées in vitro (expérience sur fibre isolée en laboratoire).
In situ (directement sur un être vivant), les choses semblent différentes.
- Dans une cellule, l'enzyme limitée (PFK) par la baisse du pH en laboratoire s'exprime pour ainsi dire normalement.
- La baisse du pH suite à un exercice supra max de 10 s est inéluctable, mais il faut 10 min pour retrouver une valeur normale, bien que 3 min suffisent à récupérer.
- La fatigue musculaire arrive parfois bien plus vite sans que la glycolyse ait eu lieu.

- Les personnes ayant une déficience dans la glycolyse (maladie de McArdie) et ne créant pas d'acidose ont encore plus de problèmes dans les contractions musculaire.
- Sans changement de pH, la fatigue est fréquente.
- La température influence la fatigue : à basse température (10° C en laboratoire), la baisse du pH apporte une fatigue que l'on ne retrouve pas à des températures de la vie.

L'acidose métabolique semble responsable de 5 % de la fatigue générale.

Anecdote sur la baisse du pH :

Les hommes étant victimes d'une glycogénose de type V ou Maladie de McArdle ont une anomalie génétique entraînant une mauvaise utilisation de la glycolyse et surtout une incapacité à transformer le glycogène en glucose. Ils n'arrivent pas à créer des lactates en grande quantité. Quelles conséquences ? De très grands troubles de la contraction musculaire, douleurs dès le début de l'exercice, spasmes et contractures musculaires pouvant entraîner des dommages musculaires.
Une autre glycogènose ayant comme problème le déficit en lactate-déhydrogénase (LDH) est encore plus poussée, pas de lactate (avec le même problème que cité ci-dessus).

Système 3 : aérobie

Le terme aérobie signifie généralement qu'il y a utilisation de l'oxygène dans une réaction chimique. Cette filière peut utiliser différents substrats comme les glucides, les lipides, les protéines (cas extrême de sollicitation). Les glucides et les lipides sont mobilisés en fonction de l'intensité de l'exercice, mais nous allons voir que les glucides restent indispensables.
Le bilan de la filière aérobie à partir du glucose est le suivant :

$$C_6H_{12}O_6 + ADP + P_i + O_2 \Rightarrow H_2O + 6CO_2 + ATP$$

Un bilan ne dit rien de ce qui se passe au niveau réactions chimiques. C'est pourquoi nous en donnons les étapes ci-après.

Étape 1 (figure 16) :

L'entrée du pyruvate dans la mitochondrie marque le début du processus aérobie, mais bien que la mitochondrie puisse utiliser les lipides comme sources d'énergie, la glycolyse reste indispensable pour le bon fonctionnement des réactions chimiques.

Nous ne traiterons pas les voies anaplérotiques[17], mais elles expliquent l'utilité de la glycolyse pour permettre aux lipides d'être consommés (Jones, et coll., 2005).

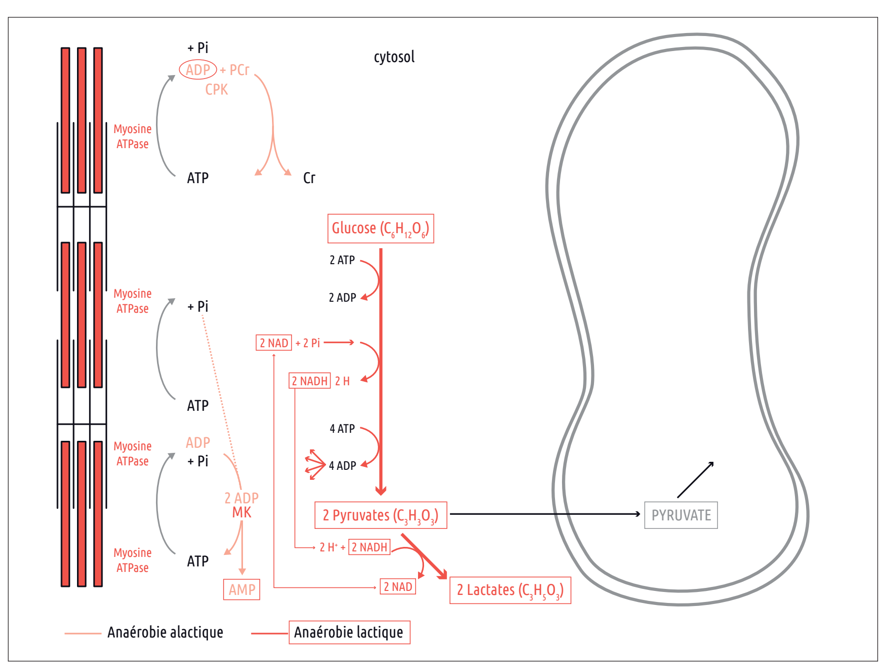


Figure 16 : Étape initiale de l'aérobie, le pyruvate entre dans la mitochondrie (Reiss 2013).

17 / Une réaction anaplérotique est une réaction permettant d'alimenter une autre réaction dans une voie métabolique. C'est donc une réaction qui produit un métabolite (espèce chimique intermédiaire) dans une voie métabolique donnée.
Par exemple, pour permettre au cycle de Krebs de fonctionner, il faut lui donner de l'oxaloacétate. Celui-ci est fourni par le phosphoenolpyruvate via le pyruvate issu de la glycolyse. L'anaplétose consiste donc à rétablir les niveaux de concentration d'une molécule chimique pour qu'une réaction puisse continuer malgré l'utilisation de ses métabolites.

Étape 2 (Figure 17) :

Le pyruvate devient de l'acéthyl-coenzyme A afin de pouvoir commencer une série de réactions découvertes par un biochimiste Anglais en 1937 que l'on nomme cycle de Krebs. L'étape du passage à l'acéthyl-coenzyme A entraîne la formation de CO_2.

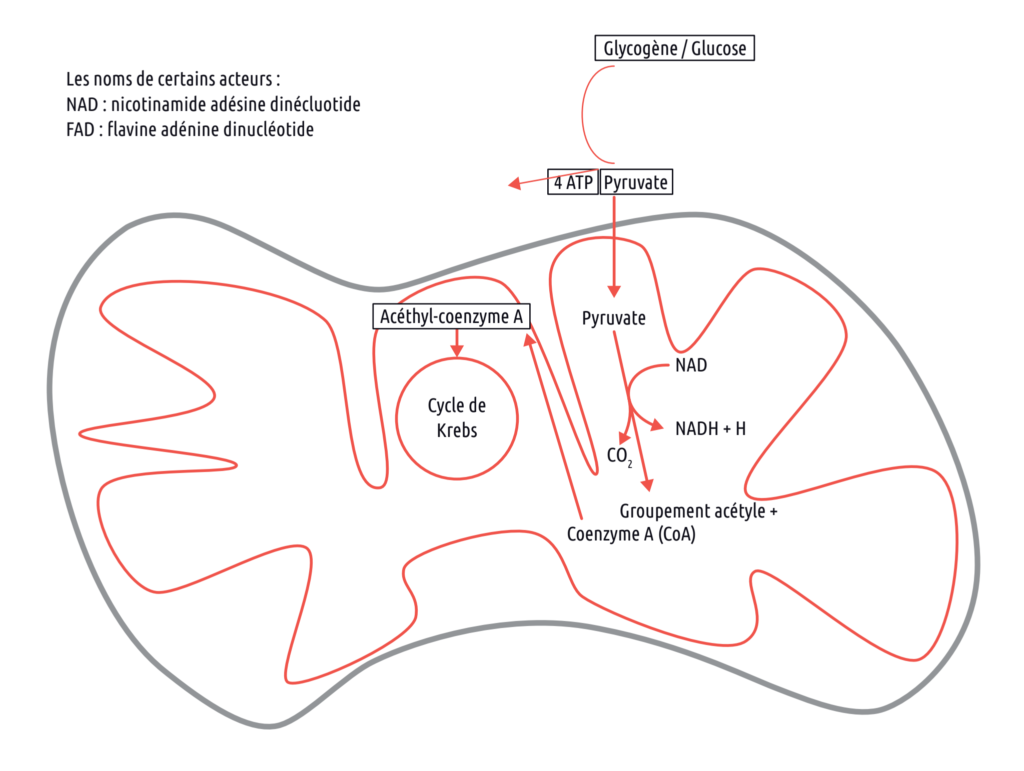


Figure 17 : Décarboxylation du pyruvate, transformation en acéthyl-coenzyme A (Reiss 2007).

Étape 3 (Figure 18) :

L'acéthyl-coenzyme A entre dans le cycle de Krebs et une série de 8 réactions chimiques vont donner à la fois des molécules riches en énergie mais aussi des déchets que la cellule devra évacuer comme le CO_2 et l'eau en trop grande quantité.

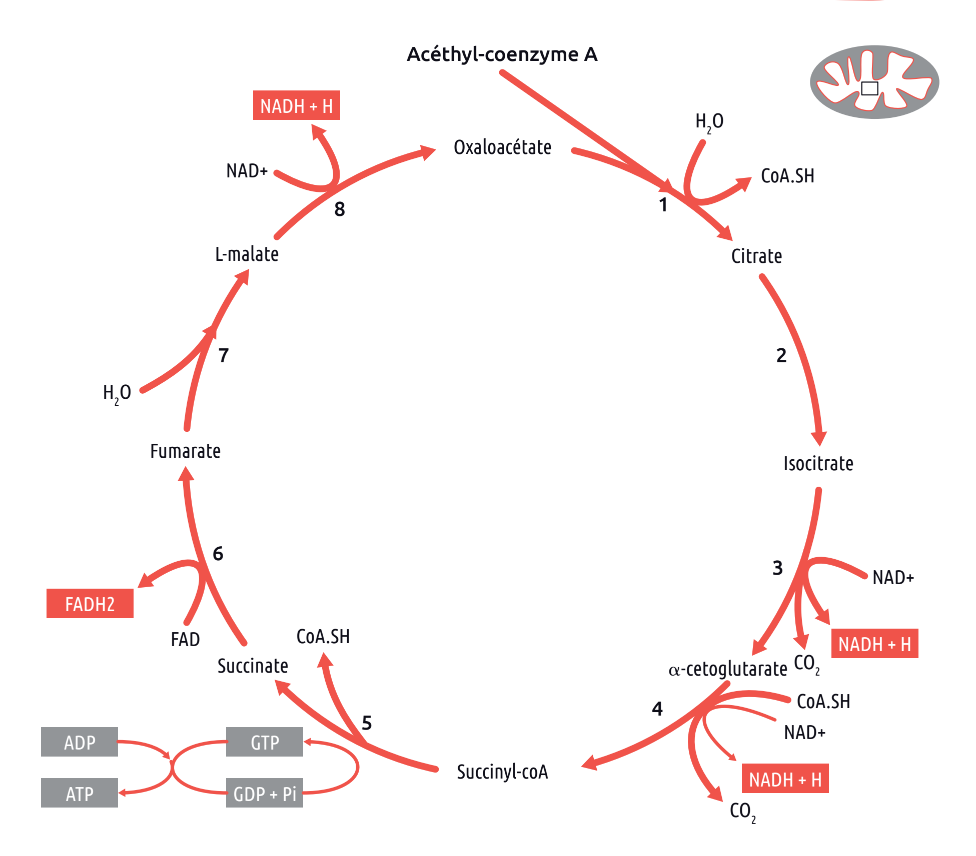


Figure 18 : Cycle de Krebs et ses 8 réactions chimiques (Reiss 2007).

Seconde idée reçue :
LE DIOXYGÈNE (O_2) ARRIVANT DES POUMONS EST TRANSFORMÉ EN DIOXYDE DE CARBONE (CO_2) DANS NOS CELLULES.

Étape 4 (figure 19) :
Les molécules riches en énergie (NADH, FADH) sortant du cycle de Krebs se dirigent vers les membranes et vont entrer dans la chaîne de transport des électrons. Le CO_2 que nous rejetons dans le système ventilatoire provient donc à la fois des réactions permettant le passage du pyruvate en acéthyl-coenzyme A et du cycle de Krebs.

Nous pouvons déjà faire tomber cette croyance qui veut que le dioxygène (O_2) se transforme en dioxyde de carbone (CO_2).

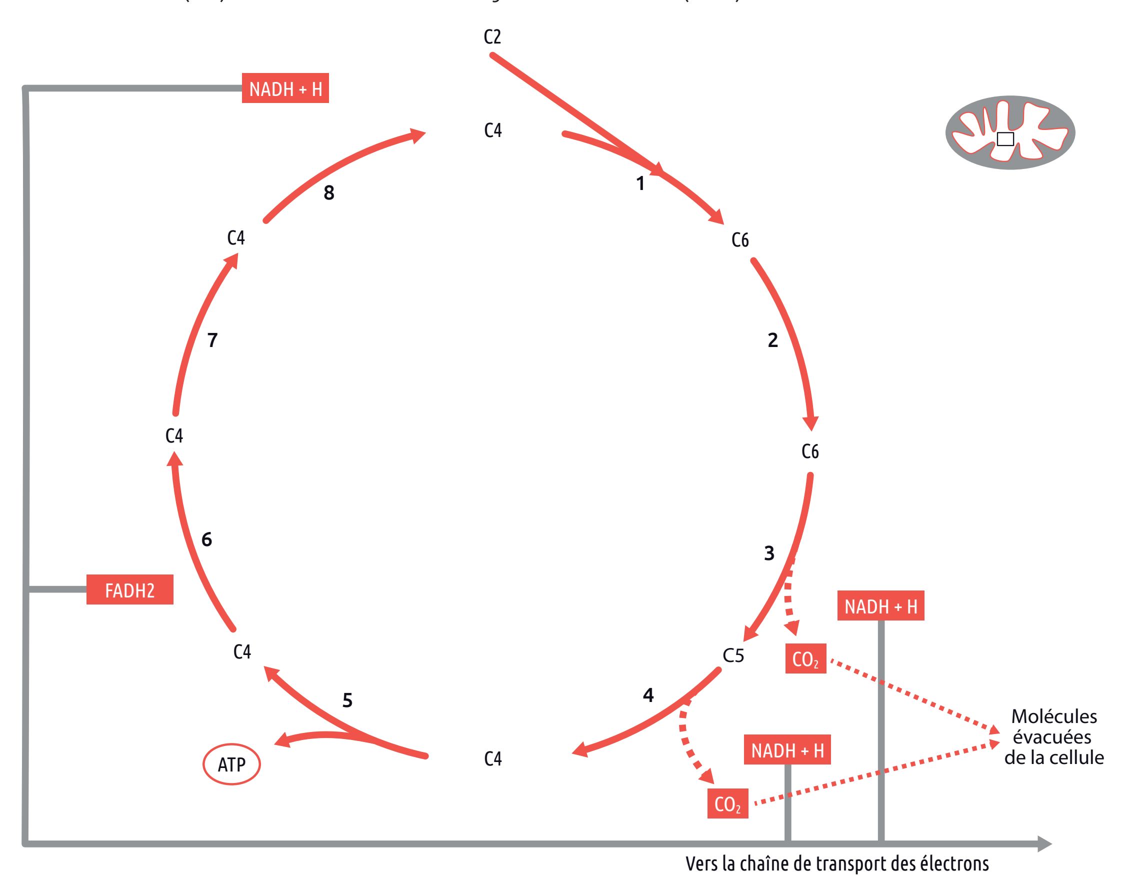


Figure 19 : Molécules riches en énergie extraites du cycle de Krebs (Reiss 2007).

Synthèse (figure 20) :

Vue d'ensemble des réactions intra-mitochondriales (Reiss 2013)

Les molécules issues du cycle de Krebs vont offrir leur énergie dans cette suite de réactions. Au final, l'oxygène qui n'intervient qu'à la fin du processus, va permettre de récupérer les ions H+ avec leurs électrons pour for-

mer de l'eau (2 H+ + ½ $O_2 \longleftrightarrow H_20$) et de resynthétiser de l'ATP. Eh oui, l'O_2 inhalé ne devient pas du CO_2 mais de l'eau en devenant l'ultime accepteur d'ions H+ limitant ainsi l'acidose métabolique grâce à la captation de 2H+.

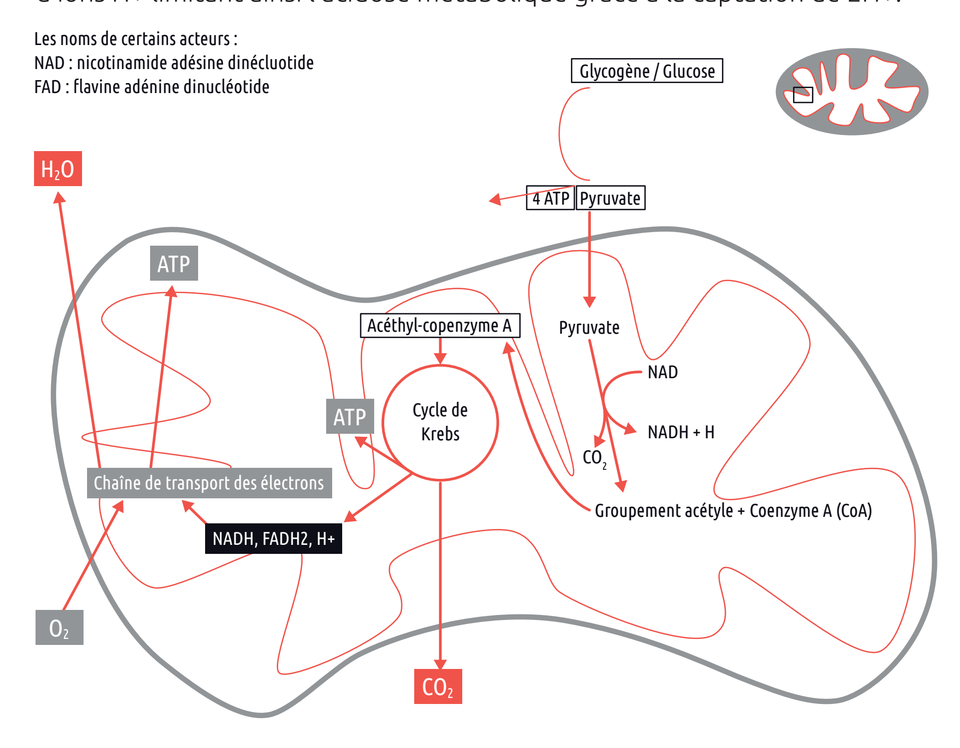


Figure 20 : Vue d'ensemble des réactions intra-mitochondriales (Reiss 2013).

De manière synthétique, le pyruvate entre dans la mitochondrie, subit une décarboxylation (libérant du CO_2) et devient un nouveau produit : l'acétyle. Ce dernier se lie au coenzyme A pour former de l'acétyl-CoA (ou acétyl-coenzyme A, seul produit pouvant être utilisé pour amorcer la première étape du cycle de Krebs).

Lors du cycle de Krebs, plusieurs réactions chimiques vont libérer de l'énergie sous forme de produit comme le NADH, FADH et l'ATP.

Les NADH et FADH sont riches en énergie mais celle-ci n'est pas directement utilisable par la cellule. Ces produits libéreront leur énergie par

étapes via la chaîne de transporteurs des électrons (CTE) ou chaîne respiratoire. L'oxygène n'intervient que dans cette dernière étape afin d'accepter les ions H+ pour former de l'eau et les empêcher d'être libérés dans la cellule ce qui augmenterait ainsi l'acidité intracellulaire. C'est dans la CTE que la majeure partie de l'ATP sera formée au sein de la mitochondrie.
Les véritables déchets des réactions aérobies sont donc le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau (H_2O).
Toutes ces étapes montrent clairement qu'il y a des interrelations entre toutes les formes de réactions chimiques qui se déroulent dans la cellule musculaire (figure 21).

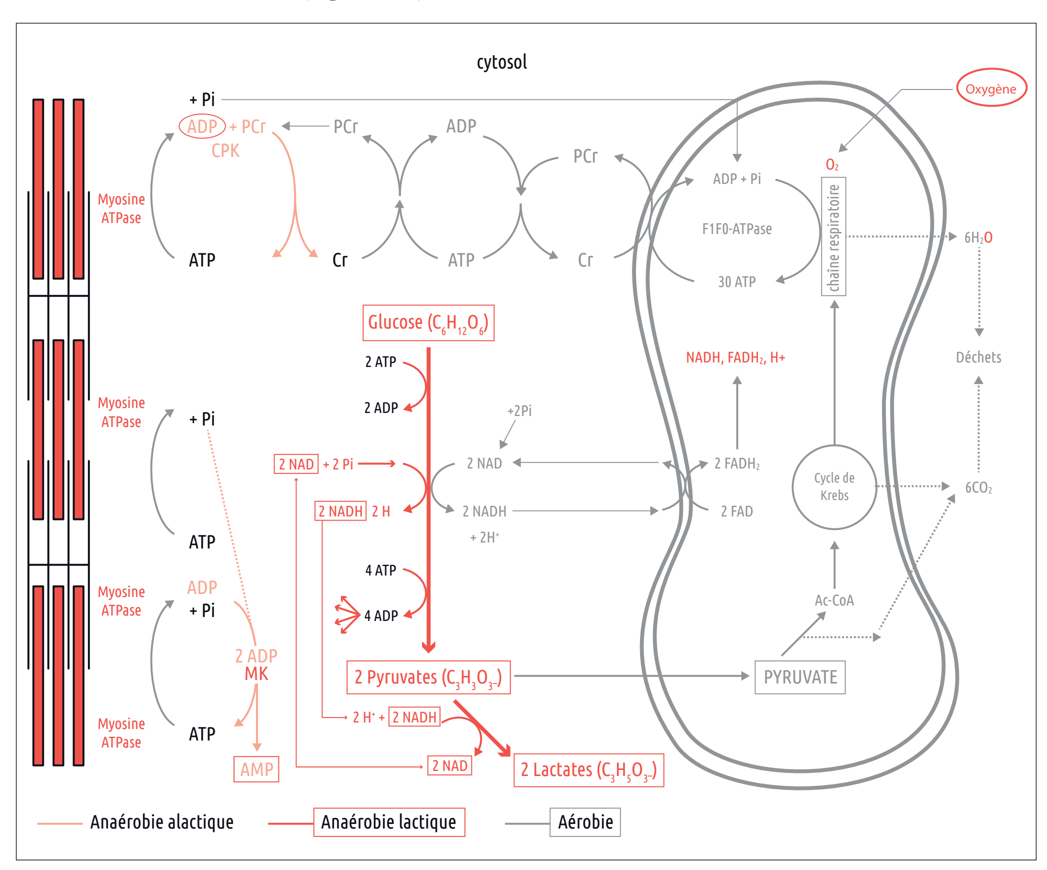


Figure 21 : Exemple de l'interaction des différentes parties du métabolisme (Reiss 2013).

L'oxygène intervient à la fin des réactions à partir des "restes" du cycle de Krebs nourri lui-même par les "restes" de la glycolyse. Mais comble de cette histoire du métabolisme, l'énergie finale de l'aérobie sert à resynthétiser la PCr et ainsi renouveler l'ATP rapidement.

Nos trois filières, si distinctes parfois dans la vision qui en est proposée généralement, ne le sont pas dans la réalité. ***Elles peuvent fonctionner brièvement de manière dominante mais seront limitées par le fonctionnement des autres.***

L'ATP produit par la phosphorylation oxydative au sein de la mitochondrie ne quitte pas cette petite structure. L'énergie qu'il contient est transférée vers l'extérieur via la créatine disponible dans le muscle pour reformer la phosphorylcréatine.

Ainsi, plus le système lié au transport de l'oxygène fonctionne, plus la phosphorylcréatine sera renouvelée, plus vite le sportif récupérera (dixit G. Cazorla)...

Bilan du système aérobie :

- un délai d'intervention tardif, efficace à partir de 2 à 3 minutes, même si les réactions oxydatives se font en permanence ;
- une puissance moyenne en comparaison des deux autres systèmes ;
- puissance : 4 à 8 min (moyenne 6 min) ;
- capacité : elle dépend du pourcentage du $\dot{V}O_2max$;
- 31 ou 29,5 ATP produits par la réaction (anciennement 38 ou 39) selon les dernières mises à jour (Moussard, 2006) ;
- le ***facteur limitant*** est l'épuisement des réserves ainsi que des enzymes du cycle de Krebs.

Bilan des filières

MÉTABOLISME	ANAÉROBIE ALACTIQUE	ANAÉROBIE LACTIQUE	AÉROBIE
Caractéristique	1 ATP	3 ATP (ou 2)	31 ATP (ou 29,5)
Substrats utilisés	PCr	Glycogène/Glucose	Lipide/Glucide/ Protide
Délai d'intervention	Nul	5 à 10 secondes	2 à 3 minutes
Puissance	Très élevée	Élevée	Fonction du $\dot{V}O_2max$
Durée de la puissance	3 à 5 secondes	10 à 40 secondes	3 à 9 minutes
Durée de la capacité	20 à 30 secondes	2 minutes	Théoriquement illimitée
Lieu de production dans la cellule	Cytoplasme cellulaire	Cytoplasme cellulaire (Extramitochondriale)	Mitochondrie
Produit final	ADP, AMP et créatine	Lactate	H2O/ CO_2
Facteurs limitants	Épuisement des réserves, manque d'O2	Manque de l'enzyme LDH. Manque d'O2	$\dot{V}O_2max$, réserve de glycogène, thermolyse
Durée de la récupération après sollicitation maximale	Reconstruction ATP, CP (6 à 8 minutes)	1h30	Glycogène en 24 à 32 heures

Les 3 "filières" sont dépendantes les unes des autres, la première est limitée par la troisième et s'exprime avec la deuxième. Elles sont imbriquées les unes dans les autres comme le montre le dernier schéma d'ensemble. Il est possible d'avoir une dominante pour un instant.

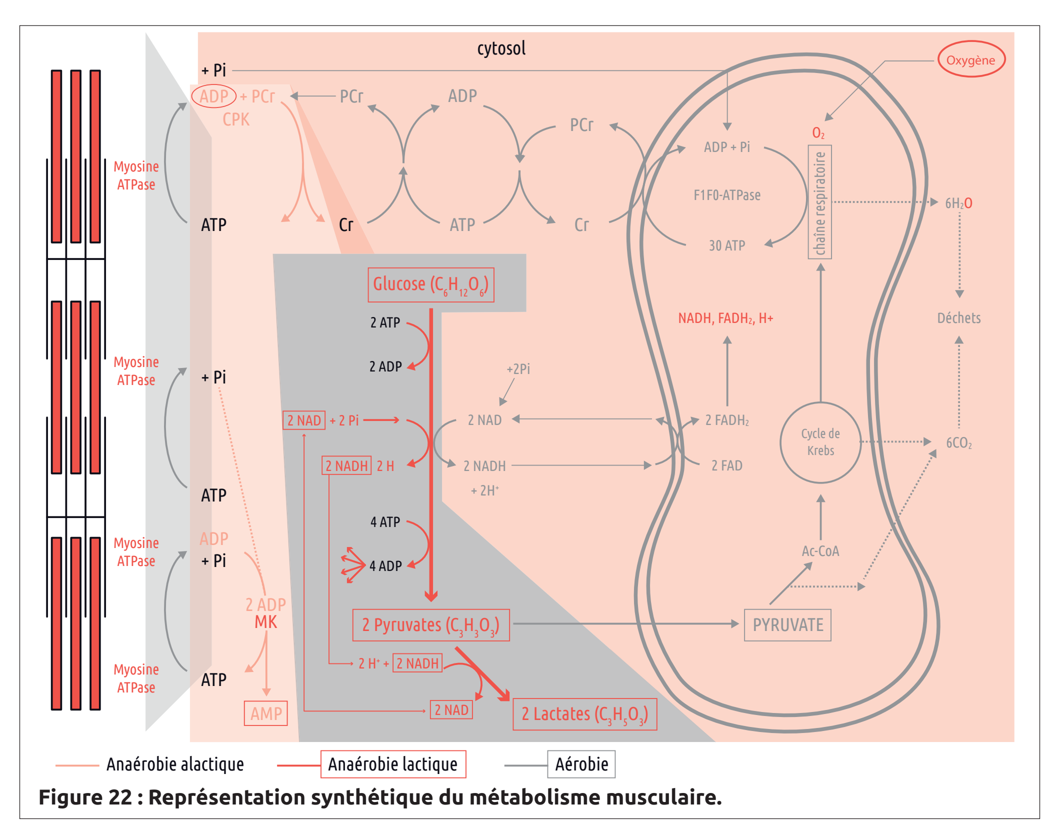


Figure 22 : Représentation synthétique du métabolisme musculaire.

Synthèse

"Les filières énergétiques" permettent la ***resynthèse de l'ATP*** à partir de ***l'ADP***, de ***la PCr*** et de différentes sources d'énergie (glucides et lipides essentiellement) afin de poursuivre la contraction musculaire dans le temps. L'activité actionne les filières ***anaérobies*** qui vont financer les débuts d'effort ou les efforts intenses le temps que l'oxygène parvienne en quantité suffisante dans les mitochondries.

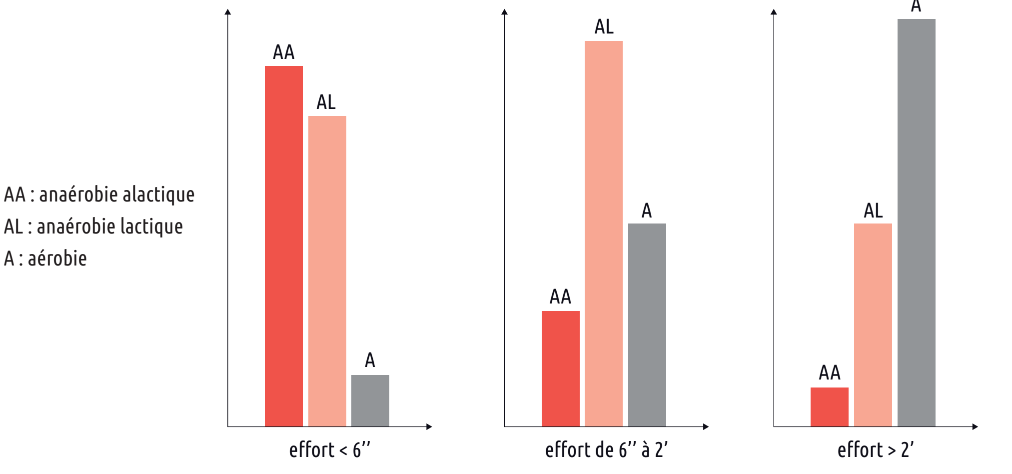
"La ***filière anaérobie alactique***" utilise les réserves de ***phosphagène intracellulaire*** (ATP+PCr). La baisse de ces réserves fait stopper le fonctionnement de cette filière.

"La ***filière anaérobie lactique***" utilise le ***glycogène*** intracellulaire ou le ***glucose*** circulant ***sans oxygène*** et produit du ***lactate*** quand les mitochon-

dries n'arrivent plus à prendre en charge les ions H+ libérés par le glucose. "La ***filière aérobie***" utilise les ***glucides ou les acides gras libres*** et de l'oxygène. Cela donne de l'eau et du gaz carbonique. C'est la filière qui permet la synthèse la plus importante d'ATP et qui resynthétise la "filière anaérobie alactique".

Les ***"trois filières"*** fonctionnent en même temps en permanence mais deviennent ***"dominantes"*** chacune à un moment qui leur est propre en fonction de la demande énergétique.

À visionner :



Troisième idée reçue :
L'OXYGÈNE N'EST UTILISÉ QU'EN AÉROBIE

En réalité, l'oxygène est toujours présent dans tous types d'efforts...
Il suffit de se souvenir que lors d'un sprint (100 m), la participation de l'oxygène est effective et la participation de la glycolyse très importante. De nombreux auteurs se sont intéressés à cette question (Saltin et al., 1971 ; Schnabel et al., 1983 ; Hirvonen et al., 1987 ; Mercier et al., 1990 ; figure 23).

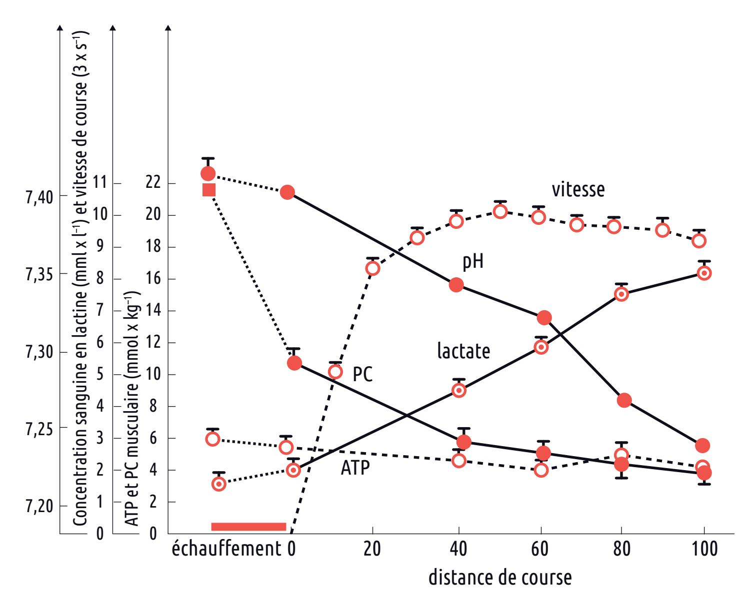


Figure 23 :
Évolution des concentrations musculaires en ATP et phosphocréatine (PC), des valeurs sanguine du pH et de la concentration en lactate ainsi que des vitesses de course lors d'un sprint sur 100 m. Les athlètes ont effectué plusieurs sprints sur des distances de 40, 60, 80 et 100 m. (Hirvonen et coll., 1987).

En comparaison ci-dessous (figure 24), 6 secondes d'efforts maximaux versus 10 secondes. Les valeurs relatives (%) montrent clairement que l'oxygène est utilisé même durant un sprint de 60 ou 100 m.

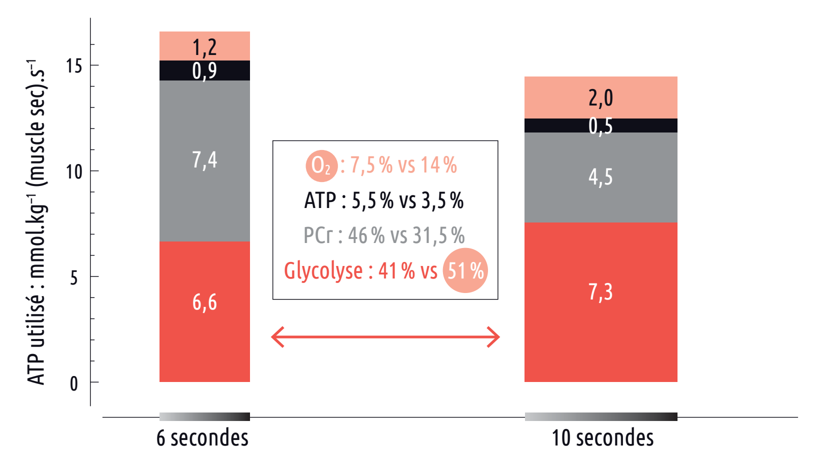


Figure 24 : Comparaison des contributions énergétiques relatives dans deux sprints. Les "trois filières" sont présentes.

Qu'un sprint de 100 m ne soit pas un exercice à dominante alactique n'est pas nouveau et que la lactatémie (qui traduit la participation importante de la glycolyse) soit très forte sur un effort de 10 secondes ne l'est pas également dans la littérature plus sérieuse (figure 25).

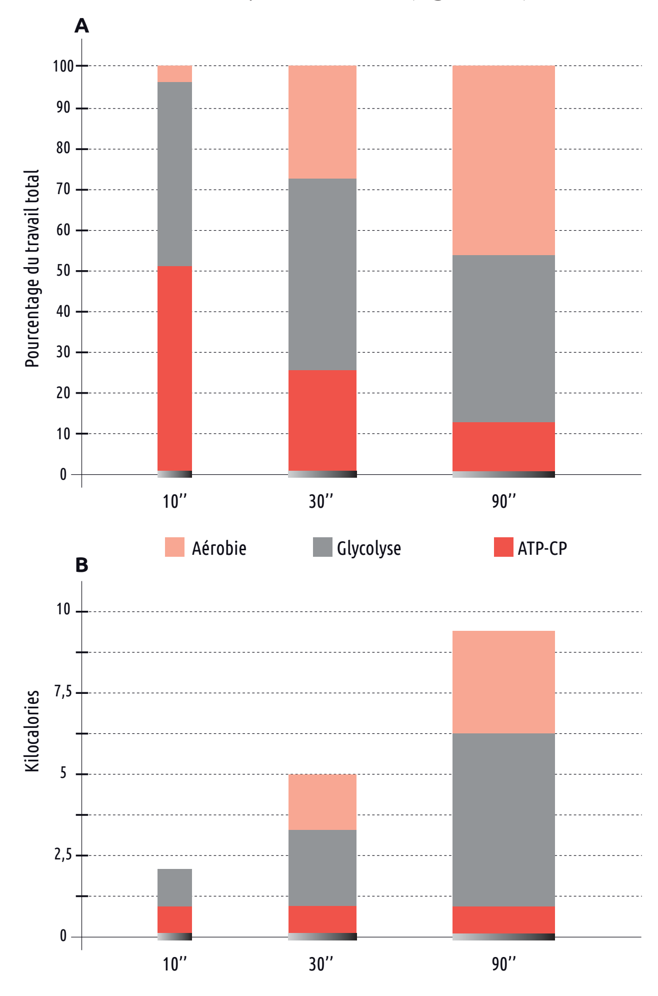


Figure 25 : Contribution relative des trois filières énergétiques au travail total accompli au cours des trois épreuves de courte durée. A : pourcentage de travail total.B : dépense d'énergie totale. Observations résultant du test de Katch (p. 194). (Données du Applied Physiology Labaratory, University of Michigan, Ann Harbor).

Le Tableau 1 que nous retrouvons partout et qui se veut résumer la contribution relative des différentes filières dans des exercices maximaux est aujourd'hui obsolète.

Il s'avère que ces données sont parfaitement théoriques et sont une source d'erreur pour la compréhension de l'entraînement sportif ou des méthodes les plus appropriées pour obtenir une gestion de la composition corporelle.

Tableau 1 : ce que nous pensions être la réalité en théorie…

POURCENTAGES DE CONTRIBUTION DANS LA PRODUCTION D'ATP Tableau que nous pouvions trouver dans les livres de physiologie					
Courses (m)	PCr (%)	Glycogène		Glucose sanguin (glycogène hépatique) (%)	Triglycérides (acides gras) (%)
		Anaérobie (%)	Aérobie (%)		
100 m	98	2	-	-	-
200 m	96	4	-	-	-
400 m	55	40	5	-	-
800 m	30	62 à 65	5 à 8	-	-
1 000 m	25	60 à 65	15 à 20	-	-
1 500 m	25	50 à 55	20 à 25	-	-
2 000 m	20	45 à 50	30 à 35	-	-
3 000 m	15	35 à 40	40 à 45	-	5
5 000 m	10	15 à 25	50 à 60	-	15
10 000 m	5	5 à 10	45 à 55	-	30 à 40
20 000 m	5	5	35 à 45	-	48 à 58
42 195m	2	2	30 à 40	-	56 à 66

La participation des filières réexaminée par l'observation scientifique donne les valeurs du tableau 2 qui sont certainement plus proches de la réalité.

Tableau 2 : ce que nous pensons savoir par l'observation.

Plusieurs publications apparaissent avec les nouvelles technologies et un nouveau tableau pourrait encore être construit prochainement. À retenir : la présence d'oxygène pour un sprint de 100 m et une dominante énergétique surestimée en temps normal.

POURCENTAGES DE CONTRIBUTION DANS LA PRODUCTION D'ATP D'après Newsholme et al. (1992)					
Courses (m)	PCr (%)	Glycogène		Glucose sanguin (glycogène hépatique) (%)	Triglycérides (acides gras) (%)
		Anaérobie (%)	Aérobie (%)		
100 m	48	48	4	-	-
200 m	25	65	10	-	-
400 m	12.5	62.5	25	-	-
800 m	6	50	44	-	-
1500 m	(*)	25	75	-	-
5000 m	(*)	12.5	87.5	-	-
10 000 m	(*)	3	97	-	-
42 195 m	(*)	1	74	5	20
80 000 m	(*)	-	35	5	60

(*) Dans ces épreuves la PCr est utilisée dans les premières secondes. Sa resynthèse pendant la course servira notamment pour l'accélération finale.

Moyen de renouveler l'ATP

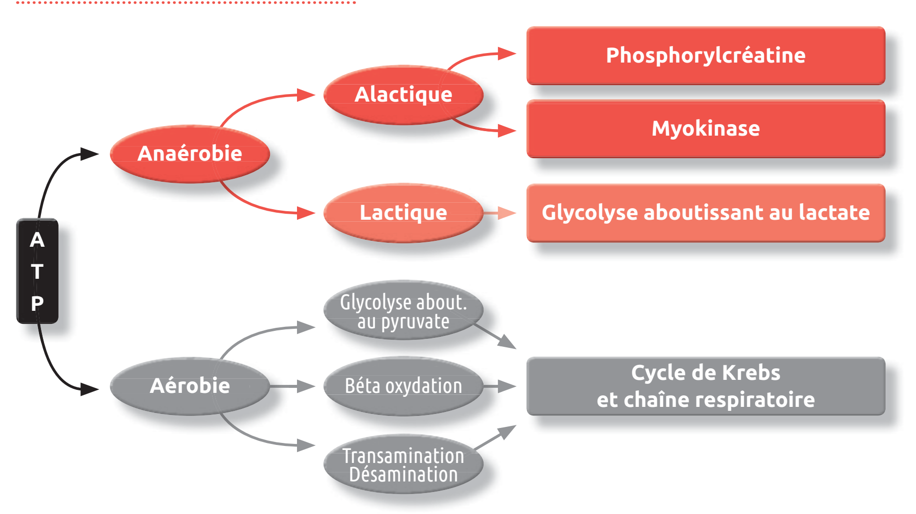


Figure 26 : Version simpliste des réactions métaboliques.

Conclusion

Il n'est peut-être pas nécessaire de tout retenir, seulement l'essentiel (figure 26).

Nous avons offert des illustrations afin d'éviter de trop commenter ce qui se passe dans nos cellules musculaires, mais il est intéressant de noter que l'anaérobie alactique et l'oxygène sont nettement plus liés que nous ne pouvions le penser puisque la resynthèse de la phosphorylcréatine n'est possible que grâce à la présence d'oxygène dans les mitochondries.

Nous pouvons noter ici l'intérêt de travailler l'endurance musculaire locale notamment pour les personnes pratiquant les exercices à très haute intensité.

Il faut garder également à l'esprit que le lactate n'est pas le déchet si souvent cité à tort. Il favorise la glycolyse en permettant aux NAD de se délester de leurs ions H+ sur le pyruvate. Il ne crée pas d'acidité supplémentaire : c'est même le contraire qui se produit lorsqu'il est fabriqué. De plus, Lacour et al. (1990) ont démontré que les athlètes les plus performants sont ceux qui en produisent le plus. "On ne s'habitue pas aux lactates ou à l'acide lactique, mais on s'habitue à en produire plus" (citation de JR Lacour au DU de Bordeaux en 2002). Cette fabrication recule d'autant l'apparition de l'acidose métabolique. Pour appuyer nos dires, citons par exemple Robergs et coll. (2004) “La production de lactate consomme également deux protons et, par définition, retarde l'acidose" (voir page 514).

C'est bien de cette dernière dont il s'agit lorsque l'on parle d'acidité intramusculaire, et non l'acidose lactique qui n'existe pas ! La contraction musculaire est elle-même une source potentielle d'augmentation de l'acidité (voir la réaction en début de partie), et les pistes de recherches sont plus souvent orientées vers les phosphates (inorganiques), (Millet, 2006).

Bibliographie

OUVRAGES

• Jones D, Round J, De Hann A. (2005) Physiologie du muscle squelettique, Italie, Elsevier.

• McArdle W, Katch F, Katch V. (2001) Physiologie de l'activité physique, Edition Maloine.

• Millet G. (2006). L'endurance, Paris, Edition Revue EPS.

• Moussard C. (2006). Biochimie structurale et métabolique, Bruxelle, Edition De Boeck.

• Poortmanns P, Boisseau N. (2008) Biochimie des activités physiques, Bruxelle, Edition De Boeck.

• Salway J.G. (2004). Metabolism at a glance, USA, Blackwell Publishing.

ARTICLES

• Allen D, Westerblad H. (2004). Lactic acid the latest performance-enhancing drug. Science,.20;305(5687):1112-3.

• Bangsbo J, Juel C. (2006). Counterpoint: lactic acid accumulation is a disadvantage during muscle activity. J Appl Physiol. 100(4):1412-3.

• Brooks GA, Henderson GC, Hashimoto T, Mau T, Fattor JA, Horning MA et al. (2006). Lactic acid accumulation is an advantage/ disadvantage during muscle activity. J Appl Physiol, 100(6):2100.

• Brooks GA. (2002). Lactate shuttles in nature. Biochem Soc Trans. 30(2):258-64.

• Burnley M, Wilkerson DP, Jones AM. (2006). Lactic acid accumulation is an advantage/ disadvantage during muscle activity. J Appl Physiol. 101(2):683.

• Cazorla G et al. (2001). Lactate et exercice : mythes et réalités. STAPS, 54 :63-76

• Francaux M., Demeure R., Goudemant JF, Poortmans JR (1999a). Effet d'un supplément alimentaire en créatine sur la concentration intramusculaire et sur la resynthèse de la phosphorylcréatine mesurées par RMN du 31P. Louvain Med. 118 : 196-204.

• Francaux M., Demeure R., Goudmant JF, Poortmans JR (2000). Effect of exogenous creatine supplementation on muscle PCr metabolism. Int. J. Sport Med., 21: 139-145.

• Francaux M., Poortmans JR. (1999b). Effects of training and creatine supplement on muscle straigth and body mass. Eur J. Appl Physiol, 153: 207-209.

• Gladden LB, Hogan MC. (2006). Lactic acid accumulation is an advantage/disadvantage during muscle activity. J Appl Physiol. 100(6):2100-1.

• Gladden LB. (2004). Lactate metabolism: a new paradigm for the third millennium. J Physiol. 01;558(Pt 1):5-30.

• Harris RC, Edwards RH, Hultman E, Nordesjö LO, Nylind B, Sahlin K. (1976). The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. Pflugers Arch. 28;367(2):137–142.

• Hirvonen et al. (1987). Breackdown of high energy phosphate compounds and lactate accumulation during short supramaximal exercise Eur J Appl Physiol. 56:253-59.

• Karelis AD, Marcil M, Péronnet F, Gardiner PF. (2004). Effect of lactate infusion on M-wave characteristics and force in the rat plantaris muscle during repeated stimulation in situ. J Appl Physiol. 96(6):2133-8.

• Lacour JR, Padilla-Magunacelaya S, Barthelemy JC, Dormois D. (1990). The energetics of middle-distance running. Eur J Appl Physiol Occup Physiol. 60(1):38-43.

• Lamb GD, Stephenson DG. (2006). Point: lactic acid accumulation is an advantage during muscle activity. J Appl Physiol. 100(4):1410-2.

• Lewis SF, Haller RG. (1986). The pathophysiology of McArdle's disease: clues to regulation in exercise and fatigue. J Appl Physiol. 61(2):391-401.

• Lindinger MI. (2006). Lactic acid accumulation is an advantage/ disadvantage during muscle activity. J Appl Physiol. 100(6):2100.

• Mercier J, Mercier B, Prefaut C. (1989). [Participation of lactic anaerobic metabolism during short and intense repeated exercises] C R Seances Soc Biol Fil. 183(1):60-6. French.

• Newsholme EA, Blomstrand E, Ekblom B. (1992). Physical and mental fatigue: metabolic mechanisms and importance of plasma amino acids. Br Med Bull. 48(3):477-95.

• Nielsen OB, de Paoli F, Overgaard K. (2001). Protective effects of lactic acid on force production in rat skeletal muscle. J Physiol. 1;536(Pt 1):161-6

• Pedersen TH, Nielsen OB, Lamb GD, Stephenson DG. Intracellular acidosis enhances the excitability of working muscle. Science. 2004 Aug 20;305(5687):1144-7.

• Philp A, Macdonald AL, Watt PW. (2005). Lactate: a signal coordinating cell and systemic function. J Exp Biol. 208(Pt 24):4561-75.

• Rayment I., Holden H.M., Whittaker M., Yohn C.B., Lorenz M., Holmes K.C. & Milligan R.A. (1993). Structure of the actin-myosin complex and its implications for muscle contraction. Science 261 : 58-65.

• Rayment I., Rypniewski W.R., Schmidt-Base K., Smith R., Tomchick D.R., Benning M.M., Winkelmann D.A., Wesenberg G. & Holden H.M. (1993). Three-dimensional structure of myosin subfragment-1: a molecular motor. Science 261:50-58.

• Renaud JM. (2006) Point: Counterpoint authors respond to commentaries on “Lactic acid accumulation is an advantage/ disadvantage during muscle activity”. J Appl Physiol. 101(1):367-8.

• Robergs RA, Ghiasvand F, Parker D. (2004). Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 287(3):R502-16.

• Sahlin K. (2006). Point:Counterpoint authors respond to commentaries on “Lactic acid accumulation is an advantage/ disadvantage during muscle activity”. J Appl Physiol. 101(1):367.

• Saltin et al. (1971). Metabolic and circulatory adjustment at onset of maximal work; In : Onset of exercise, edited by A. Gibert and P. Guile, Toulouse, France Univ of Toulouse Press 63-67.

• Schnabel A., Kindermann W. (1983). Assessment of anaerobic capacity in runners. Eur J Appl Physiol 52 : 42-46.

• Street D, Nielsen JJ, Bangsbo J, Juel C. (2005). Metabolic alkalosis reduces exercise induced acidosis and potassium accumulation in human skeletal muscle interstitium. J Physiol. 15;566(Pt 2):481-9.

• Tupling R. (2006). Lactic acid accumulation is an advantage/ disadvantage during muscle activity. J Appl Physiol. 100(6):2101-2.

• Vissing J. (2006). Lactic acid accumulation is an advantage/ disadvantage during muscle activity. J Appl Physiol. Jun;100(6):2101.

Annexes

1 • Quelques bases de biochimie concernant l'acidité

Le potentiel hydrogène (ou pH) mesure l'activité chimique des ions hydrogènes (H+). On parle couramment de protons en solution. En solution aqueuse, ces ions sont présents sous la forme de l'ion oxonium (et non pas "ion hydronium" comme cela est souvent écrit).
Le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une solution en prenant comme température de référence 25 °C. Ainsi, on peut définir plusieurs cas de figures :

- une solution est dite neutre à pH = 7;
- une solution est dite acide à pH < 7 ; plus son pH s'éloigne de 7 (diminue) et plus elle est acide ;
- une solution est dite basique à pH > 7 ; plus son pH s'éloigne de 7 (augmente) et plus elle est basique.

	0
Drainage minier acide (DMA)	< 1
Acide d'un accumulateur ou batterie	< 1
Acide gastrique	2
Jus de citron	2,4 - 2,6
Cola	2,5
Vinaigre	2,5 - 2,9
Jus d'orange ou de pomme	3,5
Bière	4,5
Café	5
Thé	5,5
Pluie acide	< 5,6
Lait	6,5
Eau pure	7
Salive humaine	6,5 - 7,4
Sang	7,34 - 7,45
Eau de mer	8
Savon	9 à 10
Chaux	12,5

2 • Les phosphagènes

Les molécules riches en phosphates sont nombreuses.

Trois d'entre elles sont régulièrement utilisées par le travail cellulaire quelle que soit sa forme : ATP, ADP, AMP.

C'est le nombre de phosphates attachés en série sur la base qui donnera son nom à la molécule comme le montre la figure page suivante (figure 27).

D'autres molécules avec du phosphate et utilisées à des fins énergétiques circulent au sein de nos cellules (figures suivantes). Le qualificatif riche ou pauvre en énergie est fonction de la position qu'il utilise dans les transferts ayant pour finalité la libération ou le stockage d'énergie. Ainsi, on distingue celles qui donnent (A - haut potentiel énergétique) et celles qui acceptent (B - faible potentiel énergétique) les phosphates (figures 28A-B et 29). La navette ADP-ATP est au centre de ces échanges.

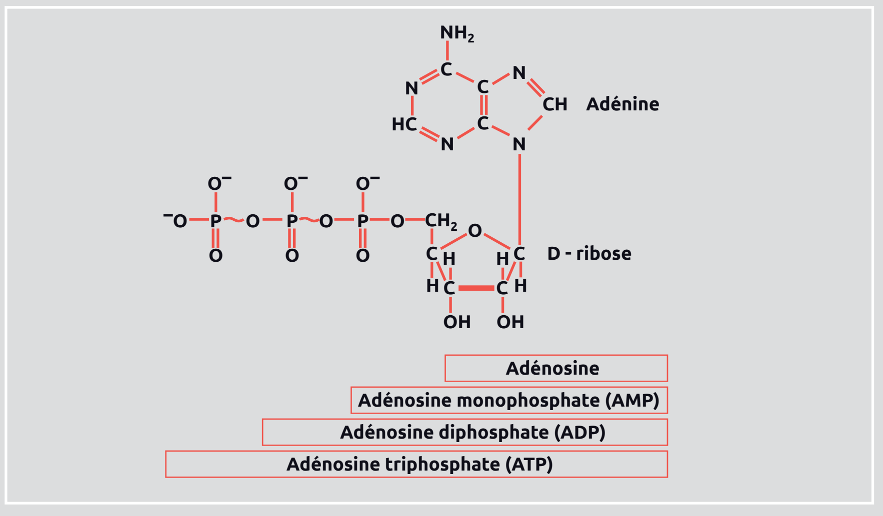


Figure 27

A - Composés phosphatés riches en énergie

Phosphoénolpyruvate

1, 3 - diphosohoglycérate

Phosphorylcréatine

B - Composés phosphatés pauvres en énergie

Glucose 6 - phosphate

Glycérol 1 - phosphate

Figure 28 : Des exemples de molécules appartenant au groupe des phosphagènes.

Création de la phosphorylcréatine

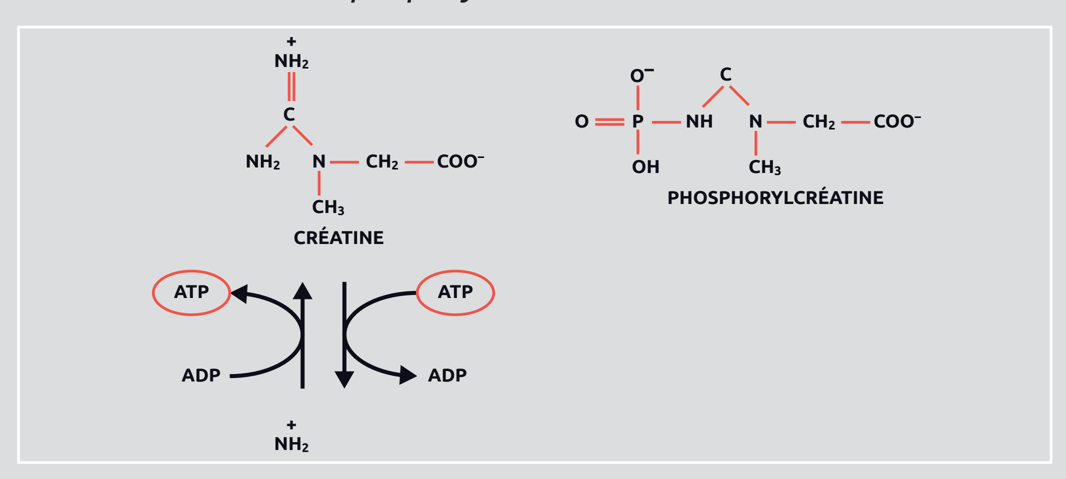


Figure 29 : Transformation de la créatine en phosphorylcréatine par adjonction d'un phosphate inorganique.

La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Si la pratique et la théorie sont réunies, rien ne fonctionne et on ne sait pas pourquoi.

Albert Einstein

2 • Apports de connaissances

Introduction

L'endurance possède un sens très large aux yeux du sportif, elle est surtout spécifique à la discipline voire à l'individu. L'endurance du marathonien n'est pas celle du footballeur et parmi la population d'une même discipline, les contributions énergétiques de chaque sportif sont individuelles.

Entre ces deux sports, la durée est différente ainsi que le type de sollicitations. Malgré l'incertitude d'un marathon sur l'hydrométrie, la température, le vent, etc., il ressortira des certitudes comme la distance (42 195 mètres), et une bonne idée du nombre de foulées par km (environ 500). Le footballeur s'attend à 90 min d'efforts mais il est possible de voir une prolongation de 2 fois 15 minutes dans certains matchs senior (la fameuse loi 7). La différence sera ici fonction de l'équipe affrontée et des conditions météorologiques éventuellement.

Combien de fois allons-nous retourner en défense, combien de duels… ?
Comment développer une endurance spécifique ?
Est-ce possible ?
Quelles armes s'offrent à nous ?
Quelles logiques ?

Définition(s) de "l'endurance"

Définitions larges

Comme souvent, il est difficile d'offrir une définition acceptable qui puisse convenir à toutes les situations sportives.

Dans le Larousse :

> Endurance : état de l'organisme au cours d'un effort sportif d'intensité moyenne mais prolongé (par opposition à résistance).
>
> Résistance : état de l'organisme au cours d'un effort sportif d'intensité brève mais intense (par opposition à endurance).

Si le dictionnaire est souvent une référence, en l'occurrence, ici, il induit fortement en erreur. Il y a déjà quelques années que les physiologistes et préparateurs physiques tentent de rectifier cette distinction faite anciennement entre résistance et endurance. L'erreur proviendrait d'un texte mal traduit de l'anglais. On préfère parler de puissance aérobie, capacité aérobie, puissance lactique ou capacité, voire simplement des qualités aérobies...

LA NOTION DE RÉSISTANCE EST À ÉVITER AU MAXIMUM,
ELLE SE RÉFÈRE DANS LA LITTÉRATURE AU TRAVAIL
DE MUSCULATION (RESISTANCE TRAINING) !

Plus globalement, on peut parler de différentes formes d'endurance (Monod et Flandrois...) :

- ***Endurance générale :*** sollicite plus des 2/3 de masse musculaire. Adaptations stables, durables et transférables.
- ***Endurance locale :*** sollicite moins de 1/3 de masse musculaire. Adaptations locales au niveau du système sollicité.

Définitions d'auteurs sportifs

PRADET (1988) définit l'endurance comme *"la faculté de réaliser des actions motrices pendant une durée maximale"*.

WEINECK (1992) *"L'endurance est considérée, en général, comme la capacité psychique et physique que possède l'athlète à résister à la fatigue"*.

CAZORLA : ***L'endurance aérobie (E.A.)*** est la fraction ou le pourcentage de $\dot{V}O_2$max ou de la P.A.M. ou encore de la vitesse aérobie maximale (V.A.M.) susceptible d'être maintenu au cours d'une épreuve d'une durée donnée. L'E.A. est aussi la durée d'une activité susceptible d'être maintenue à un pourcentage donné de $\dot{V}O_2$max, de la P.A.M. ou de la V.A.M. Par exemple fixer un pourcentage de la V.A.M. (85, 90, 95 ou 100 %) et chronométrer la durée maintenue à cette vitesse.
Dans les deux cas, l'évaluation de l'endurance aérobie nécessite de connaître préalablement la puissance aérobie maximale ou la vitesse aérobie maximale.

Définition

Sans commenter les différentes définitions des autres auteurs, nous avons décidé d'éloigner les concepts comme ***"le plus longtemps possible"***. Très rare sont les disciplines dont la durée risque d'être la plus longue possible. Certains peuvent "s'amuser" à battre des records comme tenir le plus longtemps possible en gainage (ou sur un rondin de bois à la télévision), les joueurs de tennis ne peuvent pas vraiment connaître la durée d'un match, mais dans une écrasante majorité des cas, nous connaissons soit le temps, soit l'objectif à atteindre (distance, le dernier en course...).

• *Endurance sportive : faculté à maintenir l'intensité d'actions musculaires optimales durant un temps défini ou un objectif fixé, exceptionnellement, le temps est indéterminé.*

Il est évident que nous pourrions débattre longtemps sur le type d'endurance, musculaire, cardio-vasculaire... L'idée est surtout de bien déterminer les besoins (chapitre 2).
• *L'endurance est multifactorielle et corrélée à la capacité du corps de renouveler le plus vite possible l'énergie qu'il consomme. C'est véritablement cet aspect qui est essentiel. En effet, on ne cherche pas spécialement à augmenter ses réserves énergétiques avec l'entraînement mais on cherche surtout une meilleure utilisation de l'énergie (rendement, efficience).*

Il est courant de croire que l'entraînement augmente les réserves de glycogène, oui, mais rapidement celles-ci sont optimales. Par la suite, le sportif le plus entraîné est celui qui préserve ses réserves de glycogène, qui utilise au mieux ses réserves énergétiques. Regardez les meilleures athlètes en endurance, les Kényans étant très représentés : ils ont des mollets atrophiés par rapport à un rugbyman ou un autre sportif. Cela ne les empêche pas de parcourir de longues distances dans des temps records sans être à cours d'énergie.

Définitions associées aux notions d'endurance

• La ou le $\dot{V}O_2max$? Bien que l'usage courant est de dire "la" $\dot{V}O_2max$, c'est une notion de débit d'oxygène que les lettres mentionnent ($\dot{V}$ = débit, O = oxygène, max = maximal). On ne dit pas une débit mais bien un débit. Le petit point sur le V signifie que le volume est exprimé par rapport au temps (on dit aussi "dérivé"). Par définition, un volume exprimé par rapport au temps est un débit.

Le $\dot{V}O_2max$ est donc le débit maximal ($\dot{V}$) de production d'énergie par voie oxydative. Il correspond à la quantité maximale (max) d'oxygène (O_2) qu'un organisme peut utiliser par unité de temps (L/min) au cours d'un exercice intense et/ou de durée prolongée.

• Une définition plus simple par vos auteurs : capacité de l'organisme à inhaler, transporter et utiliser l'oxygène afin de permettre la libération d'énergie des différents substrats.

Quelle est la bonne unité du $\dot{V}O_2max$?

Il est possible de lire des études exprimant le $\dot{V}O_2max$ d'un individu en l/min ou en ml/min/kg. Bien qu'il soit plus intéressant d'utiliser la deuxième dans une majeure partie des cas, une explication pourra clarifier la compréhension. La bonne unité est celle qui permet de prédire au mieux ou d'appliquer une corrélation à la performance. Lorsque le poids du corps est peu perturbant dans la performance, les l/min sont souvent plus appréciables à utiliser.

Il est très facile de passer de l'un à l'autre ; nous verrons la formule plus loin.

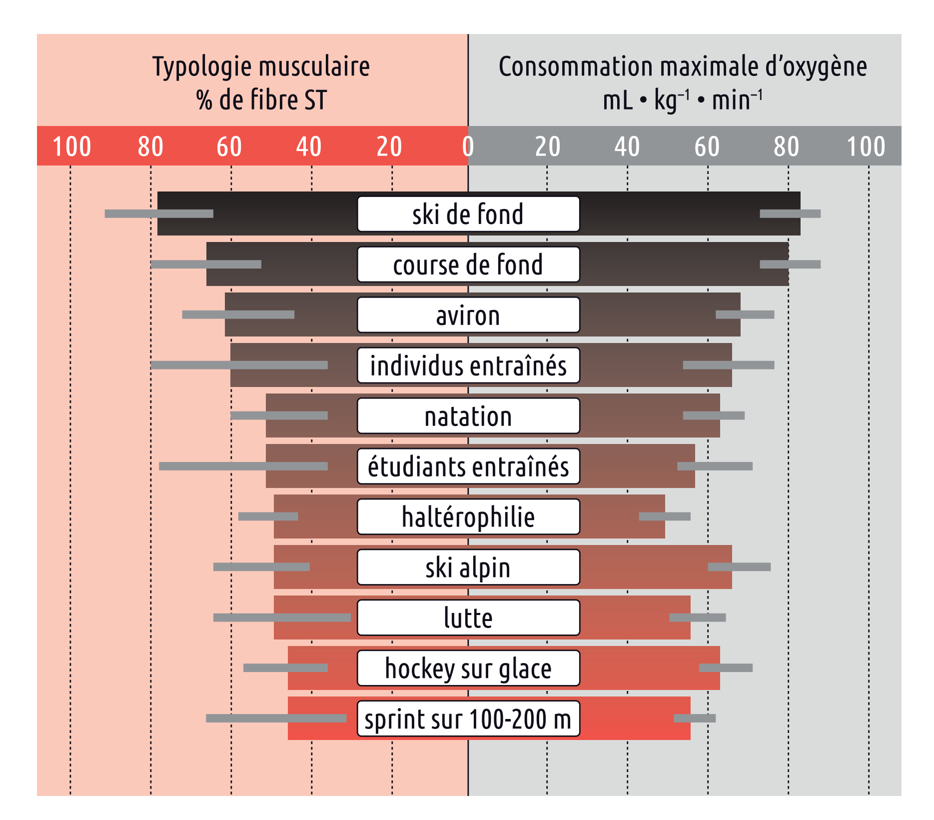


Figure 30 : Expression du V̇O₂max en fonction de diverses disciplines sportives, d'après McArdle, Katch, Katch, 2001

Il y a une bonne corrélation entre le % de fibres lentes et le V̇O₂max en fonction des disciplines sportives. Ce qui laisse à croire qu'il est impossible d'être champion de marathon et de 100 m en même temps. Le ski de fond reste l'activité qui demande les plus gros V̇O₂max car il sollicite fortement les systèmes cardio-vasculaire et musculaire (quasiment tous les muscles).

• *La mesure du V̇O₂max demande un test maximal avec analyse des gaz inspirés et expirés. Dans tous les autres cas, il s'agit de tests sous-maximaux (un test 3 paliers de l'OMS sur vélo) ou maximaux (le VAMEVAL) qui extrapolent par calcul ou estiment par étude statistique.*

Expliquons le VAMEVAL appliqué au tapis de course. Vous démarrez à 8 km/h durant 2 minutes avec une pente de 1 % (chiffre qui semble être le

plus proche de la réalité), l'incrémentation ou l'augmentation de l'effort est de 0.5 km/h par minute. Votre fréquence cardiaque s'accélère, l'amplitude de la ventilation ainsi que sa fréquence vont augmenter. Il arrivera un moment où votre corps ne pourra pas consommer davantage d'oxygène, vous serez à votre $\dot{V}O_2max$, mais aussi à une certaine vitesse que l'on nommera vitesse aérobie maximale (VAM) ou vitesse associée à $\dot{V}O_2max$ (v$\dot{V}O_2max$). Vous allez continuer l'effort peut-être 30 secondes ou une minute. L'arrêt de l'effort ne correspond pas à votre VAM réelle ; en effet, une minute, c'est 0.5 km/h de plus. Vous arrêter à 17.5 km/h alors que votre espace $\dot{V}O_2max$ est à 17 km/h surestime un peu la qualité recherchée. Certains ont donc inventé les notions de VAM pondérée (la réelle) et brute (arrêt de l'effort) figure 31.
Il est possible d'associer la notion de v$\dot{V}O_2max$ à la notion de VAM pondérée, qui est de 10 à 20% inférieure (fonction du niveau des sportifs) à la VAM brute (vitesse critique de décrochage).

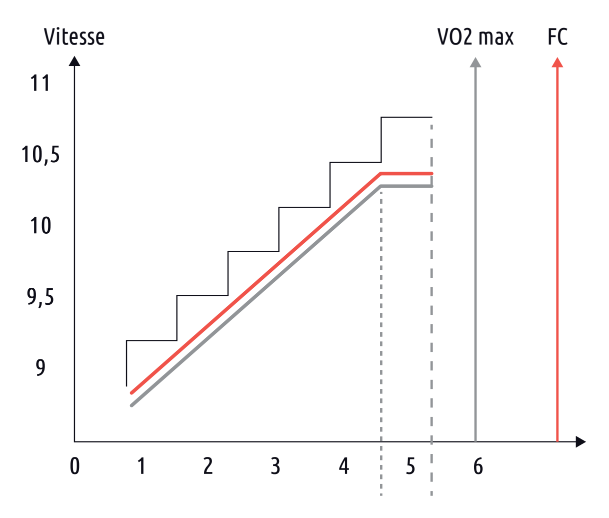


Figure 31 : Mesures pondérée et brute du $\dot{V}O_2max$. Lors d'un test de course type navette de Léger et coll, d'un test de Brue ou d'un VAMEVAL, la vitesse augmente par paliers, la fréquence cardiaque également puisque l'effort l'est tout autant. La fréquence cardiaque a tendance à suivre les besoins d'oxygène, ce qui veut dire que lorsque la FC augmente, la courbe de consommation d'oxygène augmente. À FCmax, on est à $\dot{V}O_2max$, on observe souvent un "plateau" des deux courbes. Juste à l'arrêt de l'effort, la vitesse atteinte est en générale au-dessus de la v$\dot{V}O_2max$, d'où le terme VMA brute.

Bien que la théorie soit charmante en ce qui concerne la VAM pondérée et brute, l'utilisation sur le terrain reste nébuleuse. Nous en sommes pour l'instant à utiliser la vitesse de fin de test et modifier les valeurs d'entraînement si besoin, c'est nettement plus simple.

Le $\dot{V}O_2max$

Il s'exprime en l/min ou en ml/min/kg.

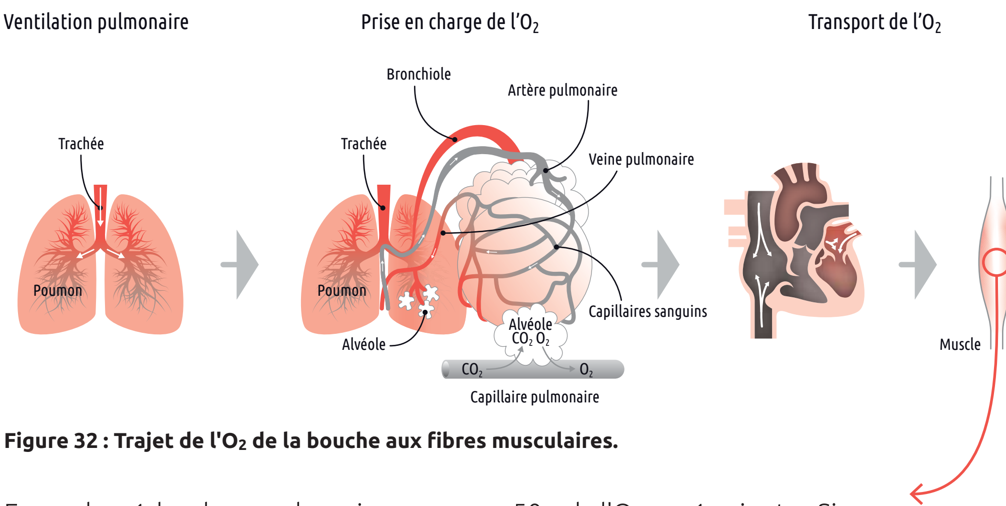


Figure 32 : Trajet de l'O_2 de la bouche aux fibres musculaires.

Exemple : 1 kg de muscle qui consomme 50 ml d'O_2 en 1 minute. Si ce même kg de muscle consomme 60 ml d'O_2 en 1 minute après des semaines d'entraînement, j'ai amélioré mon $\dot{V}O_2max$, ma capacité à fournir de l'énergie, donc mon endurance.

VAM ou VMA ou encore v$\dot{V}O_2max$

Pour les puristes, la VMA serait la vitesse maximale absolue utilisée en athlétisme (sprint) tandis que la VAM serait la vitesse aérobie maximale atteinte à $\dot{V}O_2max$ (d'où le VAMEVAL).
Lors d'un test maximal avec consommation d'oxygène, lorsque l'on rencontre un plateau d'utilisation de l'oxygène, un plafonnement de la fréquence cardiaque, nous estimons avoir atteint le $\dot{V}O_2max$; à ce moment, on note la vitesse à laquelle le sportif court.

La vitesse aérobie maximale (V.A.M.) est donc la vitesse maximale de course atteinte à $\dot{V}O_2$max. Elle résulte de l'interaction de trois facteurs :
1 • du $\dot{V}O_2$max ;
2 • de l'efficacité de la foulée (économie de course) ;
3 • de la motivation pour pouvoir atteindre le $\dot{V}O_2$max.

Et la PAM (ou PMA) ?

La puissance aérobie maximale (P.A.M.) est la quantité maximale d'oxygène qu'un organisme peut utiliser par unité de temps (généralement par minute) au cours d'un exercice musculaire intense et d'une durée égale ou supérieure à trois minutes. Elle correspond au $\dot{V}O_2$max.
"Puissance aérobie : énergie musculaire fonctionnelle exprimée en Watts à $\dot{V}O_2$max."

Qu'est-ce qu'une bonne valeur de $\dot{V}O_2$max ?

Le tableau ci-dessous vous donne à titre indicatif les valeurs du $\dot{V}O_2$max en fonction du niveau de condition physique.

Populations	$\dot{V}O_2$max (ml/min/kg)	VAM équivalente (km/h)
Adultes peu ou moyennement actifs	30 à 45	8.8 à 12.8
Adultes en bonne condition physique	45 à 55	12.8 à 15.8
Adultes en excellente condition physique	55 à 65	15.8 à 18.5
Athlètes d'élites en sports aérobies	65 à 90	> 18.5

Tableau 1 : Valeurs de $\dot{V}O_2$max représentatives de la population standard.

Chiffre plus large de la population sédentaire

L'économie de locomotion (de nage, de pédalage, toutes techniques…) représente l'énergie requise pour se déplacer à une vitesse donnée ou à un pourcentage donné de $\dot{V}O_2$max ou de la V.A.M. Le sujet le plus "économe" ou présentant le meilleur rendement sera celui qui dépensera le moins d'énergie pour se déplacer sur une distance donnée à une vitesse donnée.

Allez courir avec une entorse, vous comprendrez la notion d'économie de course ; pour aller à 8 km/h, vous allez dépenser bien plus d'énergie qu'avant.

Rien que l'écoute du pied contre le sol d'un coureur renseigne sur son expérience et indirectement sur son économie de course. Le pas doit être léger.

Le tableau ci-après renseigne, pour une population générale, en fonction du sexe et de l'âge du sujet, de l'estimation de sa condition physique cardio-respiratoire.

	VO2max (ml/min/kg)							
	Âge (années)	Très insuffisant	Insuffisant	Faible	Moyen	Bon	Très bon	Excellent
Femme	20-24	< 27	27-31	32-36	37-41	42-46	47-51	> 51
	25-29	< 26	26-30	31-35	36-40	41-44	45-49	> 49
	30-34	< 25	25-29	30-33	34-37	38-42	43-46	> 46
	35-39	< 24	24-27	28-31	32-35	36-40	41-44	> 44
	40-44	< 22	22-25	26-29	30-33	34-37	38-41	> 41
	45-49	< 21	21-23	24-27	28-31	32-35	36-38	> 38
	50-54	< 19	19-22	23-25	26-29	30-32	33-36	> 36
	55-59	< 18	18-20	21-23	24-27	28-30	31-33	> 33
	60-65	< 16	16-18	19-21	22-24	25-27	28-30	> 30
Homme	20-24	< 32	32-37	38-43	44-50	51-56	57-62	> 62
	25-29	< 31	31-35	36-42	43-48	49-53	54-59	> 59
	30-34	< 29	29-34	35-40	41-45	46-51	52-56	> 58
	35-39	< 28	28-32	33-38	39-43	44-48	49-54	> 54
	40-44	< 26	26-31	32-35	36-41	42-46	47-51	> 51
	45-49	< 25	25-29	30-34	25-39	40-43	44-48	> 48
	50-54	< 24	24-27	28-32	33-36	37-41	42-46	> 46
	55-59	< 22	22-26	27-30	31-34	35-39	40-43	> 43
	60-65	< 21	21-24	25-28	29-32	33-36	37-40	> 40

Tableau 2 : Barème de $\dot{V}O_2$max en fonction de l'âge et du sexe.

Vous avez la VAM ? Vous pouvez en déduire une performance statistique sur une épreuve de course à pied à partir du tableau suivant.

VAM Km/h	$\dot{V}O_2$max ml/min/kg	PERFORMANCES POTENTIELLES (h : min : s) selon différentes distances de course (m)										
		800	1000	1500	2000	3000	5000	10000	15000	20000	30000	42195
14	49.0	2:59	3:56	6:30	9:05	14:28	25:20	56:15	1:27:23	1:59:22	3:15:43	4:54:07
15	52.5	2:46	3:38	5:59	8:20	13:16	23:11	50:47	1:18:46	1:47:29	2:53:20	4:17:48
16	56.0	2:35	3:24	5:32	7:43	12:15	21:23	46:17	1:11:42	1:37:45	2:35:33	3:49:28
17	59.5	2:26	3:11	5:09	7:10	11:23	19:50	42:30	1:05:47	1:29:38	2:21:05	3:26:44
18	63.0	2:17	2:59	4:50	6:42	10:38	18:30	39:18	1:00:47	1:22:46	2:09:06	3:08:06
19	66.5	2:10	2:49	4:32	6:17	9:58	17:20	36:33	56:29	1:16:52	1:59:57	2:52:34
20	70.0	2:03	2:40	4:17	5:56	9:23	16:18	34:10	52:45	1:11:45	1:50:18	2:39:23
21	73.5	1:57	2:32	4:03	5:36	8:52	15:23	32:04	49:29	1:07:17	1:42:49	2:28:05
22	77.0	1:51	2:25	3:50	5:19	8:24	14:34	30:12	46:36	1:03:20	1:36:17	2:18:16
23	80.5	1:46	2:18	3:39	5:07	7:59	13:50	28:33	44:01	59:30	1:30:32	2:09:41
24	84.0	1:42	2:12	3:29	4:49	7:36	13:10	27:04	41:43	56:41	1:25:26	2:02:06
25	87.5	1:37	2:06	3:20	4:36	7:15	12:34	25:44	39:39	53:51	1:20:53	1:55:21

Tableau 3 : Valeurs prédictives du temps de course en fonction de la distance et de la VAM.

Effet de l'endurance, évaluation

Effet de l'endurance

Que pouvons-nous espérer d'un développement de cette qualité physique ?

- Être capable de renouveler l'ATP plus rapidement.
- Augmenter l'utilisation de lactate par les transporteurs de lactates, donc produire davantage d'énergie.
- Soutenir des exercices d'intensité et de durées élevées.
- Mieux récupérer après un exercice intense (surtout la phosphorylcréatine).
- Être plus actif sans manifester une fatigue excessive.
- Supporter des charges d'entraînement importantes.
- Être plus performant lors de compétitions de longue durée.

- Mobiliser les graisses plus rapidement (donc épargner le glycogène).
- Obtenir un bénéfice sur la santé, rôle prophylactique (protéger le cœur des mauvais transporteurs du cholestérol, mieux réguler la glycémie donc prévenir le diabète…).

Un des aspects importants est d'apporter un maximum d'énergie aux muscles par la fabrication de nouveaux vaisseaux sanguins ; ce phénomène se nomme l'angiogenèse, on parle aussi de capillarisation.

Jack Arnault, entraîneur d'athlétisme, expliquait "qu'il est important de développer l'endurance de base avant de réaliser des séances de qualité. Il ne sert à rien d'avoir une pompe cardiaque puissante si le système de transport du sang vers les cellules musculaires n'est pas efficace…"[18]

Comment évaluer ?

Nous proposons trois manières d'évaluer :
- soit par un test sous-maximal. Forme adaptée pour les débutants, vous ne poussez pas l'individu au maximum de ses capacités ;
- soit par un test maximal ;
- soit par une performance de compétition.

Tests de terrain

Il est aisé de trouver sur la toile des tests d'endurance, nous n'en citerons que quelques-uns, ceux que nous trouvons les plus utilisés.

- Test de Cooper (1968) ou test de la plus grande distance parcourue en 12 minutes.
- Test 3 paliers de l'OMS.
- Test progressif de course navette de Léger et Coll (1982).
- Test progressif Vam-éval de Cazorla et Léger (1993).
- Test maximal sur vélo ergomètre.

18 / Quelques données récentes démontrent qu'au niveau des maladies cardiaques, ce n'est pas aussi simple. Certaines formes de travail s'avèrent plus intéressantes que d'autres encore aujourd'hui utilisées.

Test de Cooper (1968) ou test de la plus grande distance parcourue en 12 minutes

Ce test consiste à parcourir la plus grande distance en 12 minutes afin d'en déduire le $\dot{V}O_2max$. $\dot{V}O_2max$ = (distance en mètre – 504.9) : 44,73

Matériel :
Idéalement, une piste d'athlétisme en courant à 20 cm du bord permet de compter assez facilement la distance. Sinon, un tapis de course avec une pente à 1% pour se rapprocher de la réalité, au pire, un tapis de course (jogger).

Protocole :
Pas d'échauffement, vous courez à la vitesse que vous voulez, seul compte le résultat.

Exemple :
5 tours + 100 m = 2100 m
$\dot{V}O_2max$ = (2100 – 504.9) : 44,73
$\dot{V}O_2max$ = 35,6 ml/min /kg

Le tableau de la page 123 vous renseigne sur la pertinence du chiffre en fonction de l'âge et du sexe.

Test 3 paliers de l'OMS

Ce test a pour objectif d'évaluer le débit maximale d'oxygène (le $\dot{V}O_2max$). Ce test mesure indirectement la puissance maximale (puissance aérobie maximale théorique) en watt par extrapolation, en lien avec l'estimation de la fréquence maximale cardiaque. Le $\dot{V}O_2max$ est trouvé suite à un calcul.

Matériel :
- Vélo ergométrique à freinage mécanique ou électromagnétique.
- Si possible, cardio-fréquencemètre, oxymètre de pouls.

Protocole :
Pédaler sur une période de 12 minutes fractionnées en 3 paliers égaux de 4 minutes en augmentant la puissance à chaque palier en fonction de l'âge, du sexe, du poids et de la fréquence cardiaque. De là, sera calculée la capacité maximale d'absorption d'oxygène ($\dot{V}O_2max$) qui, divisée par le poids du corps, donnera l'indice de condition aérobie.

Avant de commencer l'épreuve, il faut s'assurer du bon réglage de l'ergomètre (hauteur de la selle notamment), il faut choisir à partir d'un tableau statistique de référence (cf. p. 128) qui prend en compte l'âge, le sexe et le poids, les puissances de référence pour chacun des 3 paliers.

Suite à un échauffement de 2 à 4 minutes avec une charge d'environ 10 à 20 watts, l'épreuve commence dès que la première des 3 puissances (P1) est appliquée. Pour définir les puissances respectives des 3 paliers, on peut se référer à la table de cotation de Shepard (1969).
Le sujet doit pédaler à une cadence d'environ 60 tours par minute (60 RPM) pendant 12 minutes.

Il convient alors de mesurer la fréquence cardiaque sur les dernières secondes de la 4e minute (FC1).

Augmenter la puissance correspondant au deuxième palier (P2). Mesurer la fréquence cardiaque sur les dernières secondes de la 8e minute (FC2).
Augmenter la puissance correspondant au troisième palier (P3). Mesurer la fréquence cardiaque sur les dernières secondes de la 12e minute (FC3).
À la fin des 12 minutes, le sujet continue à pédaler avec une puissance de 10 à 20 watts pour récupérer.

Durée totale :
Faire un échauffement de 4 min, enchaîner avec 3 paliers de 4 min sans interruption, puis terminer par 3-4 min de récupération au niveau d'intensité utilisé à l'échauffement. Soit un total de 19-20 min.

HOMMES												
Âge	20 - 29			30 - 39			40 - 49			50 ans et plus		
Poids	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 1	Palier 2	Palier 3
50	55-65	85-95	110-120	50-60	80-90	100-110	45-55	70-80	85-95	35-45	55-65	70-80
55	65-75	100-110	125-135	60-70	90-100	105-115	50-60	75-85	95-105	40-50	60-70	80-90
60	70-80	110-120	140-150	65-75	100-110	125-135	55-65	85-95	105-115	45-55	70-80	85-95
65	75-85	115-125	145-155	70-80	105-115	135-145	60-65	90-100	115-125	50-60	75-85	90-100
70	85-95	130-140	160-170	75-85	115-125	150-160	65-75	100-110	125-135	55-65	80-90	100-110
75	90-100	140-150	170-180	80-90	125-135	160-170	70-80	110-120	140-150	60-70	85-95	110-120
80	90-105	145-155	180-190	85-95	135-145	170-180	75-85	115-125	145-155	65-75	90-100	120-125
85	100-110	160-170	200-210	90-100	145-155	180-190	85-95	125-135	160-170	70-80	95-105	125-135
90	110-120	170-180	210-220	100-110	155-165	190-200	90-100	135-145	170-180	75-85	105-115	135-145
95	115-125	175-185	220-230	105-115	160-170	200-210	95-105	145-155	180-190	80-90	110-120	140-150
100	125-135	185-195	235-245	115-125	170-180	215-225	110-120	150-160	190-200	85-95	120-130	150-160

FEMMES												
Âge	20 - 29			30 - 39			40 - 49			50 ans et plus		
Poids	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 1	Palier 2	Palier 3
40	40-50	60-70	75-85	35-45	55-65	70-80	30-40	50-60	60-70	25-35	35-45	45-55
45	45-55	65-75	85-95	40-50	60-70	80-90	35-45	55-65	70-80	30-40	40-50	55-65
50	50-60	75-85	95-105	45-55	70-80	90-100	40-50	65-75	80-90	30-40	45-55	60-70
55	55-65	80-90	105-115	50 - 60	75 - 85	100-110	45-55	70-80	90-100	35-45	50-60	65-75
60	60-70	90-100	115-125	55-65	85-95	110-120	50-60	80-90	100-110	40-50	60-70	75-85
65	65-75	100-110	125-135	60-70	95-105	120-130	55-65	85-95	110-120	45-55	65-75	85-95
70	75-85	110-120	140-150	70-80	105-115	135-145	60-70	95-105	120-125	45-55	70-80	90-100
75	80-90	120-130	155-165	75-85	115-125	150-160	65-75	100-110	130-140	50-60	75-85	95-105
80	85-95	125-135	160-170	80-90	120-130	155-165	70-80	110-120	140-150	55-65	80-90	105-115
85	90-100	135-145	170-180	85-95	130-140	165-175	75-85	115-125	150-160	55-65	85-95	110-120
90	95-105	145-155	180-190	90-100	140-150	175-185	80-90	125-135	155-165	60-70	95-105	120-130

Tableau 4 : Charges de travail en watts pour chacun des 3 paliers selon l'âge, le sexe et le poids du sujet. ***Shepard R.J. A nomogram to calculate the oxygen cost of running at slow speeds. J. Sports Med. Phys. Fitness, 9 : 10-16, 1969.***

Attention !

Dans le protocole du test, il est possible d'ajouter :

- **25 watts aux valeurs du tableau pour les personnes actives,**
- **50 watts pour les personnes sportives car les valeurs sont données pour les sédentaires.**

Sinon les FC recueillies seront trop faibles à chaque palier pour obtenir une pente significative permettant de la faire croiser avec celle de la FC max théorique (ligne horizontale du graphe page suivante).

L'interprétation des résultats est fonction des trois valeurs de fréquence cardiaque obtenues respectivement à la 4e, 8e et 12e minutes. Ces trois valeurs permettent d'établir une droite de régression linéaire avec la fréquence cardiaque maximale théorique (FCMT) du sujet. Le problème réside dans l'obtention de la FCMT. Il est possible, avec les aléas que cela comporte, d'opter pour la formule de Fox et Haskell (220 – âge). Mieux, il est possible de se servir de la formule proposée par Gellish et coll. (2007) ; ***Fcmax théorique = 206.9 – (0.67 x âge).*** (Cf. p. 164 pour plus de précisions). Cette relation va permettre l'appréciation de la puissance maximale théorique de travail (PMT).

Application pratique :

Homme de 40 ans, pesant 100 kg, FC max théorique de 180 BPM

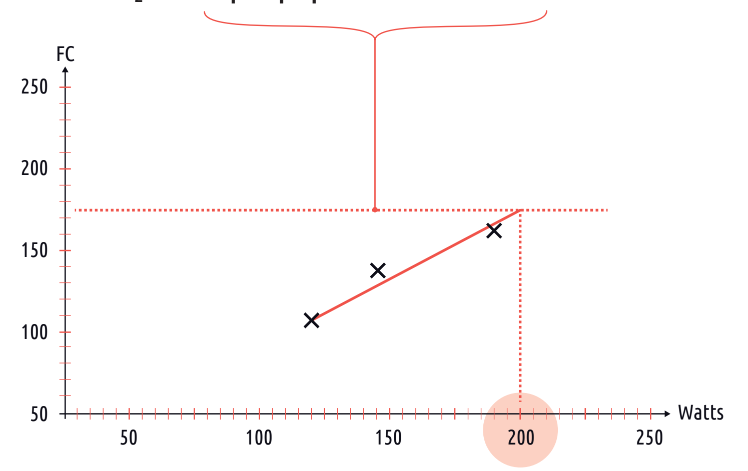
Application au test 3 paliers

PALIER 1	PALIER 2	PALIER 3
Puissance : 110 watts	Puissance : 150 watts	Puissance : 190 watts
FC fin P1 : 115 BPM	FC fin P2 : 145 BPM	FC fin P3 : 168 BPM
Cadence moyenne observée : 60	Cadence moyenne observée : 59	Cadence moyenne observée : 62

Tableau 5

La première étape, compte tenu des valeurs enregistrées pour le test et des indications générales concernant le pratiquant est de déterminer sa puissance maximale théorique de travail et son $\dot{V}O_2$max en ml/min/kg.

Figure 33 : Construction graphique de l'estimation de la PMT. Cette droite correspond à la FCmax théorique obtenue avec la formule de Gellish et coll. par exemple. C'est du croisement de cette valeur plafond théorique et des valeurs sous-maximales mesurées pendant le test que l'on obtient au final la puissance maximale (en watt) nécessaire à l'estimation du $\dot{V}O_2max$ tel qu'expliqué dans ce document.



En traçant notre droite de régression linéaire (droite qui capte les 3 points obtenus), on constate que sa PMT est d'environ 200 watts.
Sur cycloergomètre à partir de l'appréciation de la PMT, il est possible de "prédire" la consommation maximale d'oxygène à partir des équations suivantes :

PMT comprise entre 50 et 200 watts : $\dot{V}O_2max$ = 0,012 x PMT + 0,3
PMT comprise entre 200 et 400 watts : $\dot{V}O_2max$ = 0,0146 x PMT - 0,14

En ce qui concerne notre pratiquant, nous obtenons la valeur suivante : 0,012 x 200 = 216 + 0,3 = 2,7 litres par minute. ***Nous obtenons un $\dot{V}O_2max$ absolu !***
Si on le ramène au poids de corps pour obtenir un $\dot{V}O_2max$ relatif, nous obtenons : (2,7 x 1000) / 100 kg = 27 ml/min/kg.

Le tableau 2 de la page 123 vous renseigne sur la pertinence du chiffre en fonction de l'âge et du sexe.

➔ Test progressif de course navette de Léger et coll. (1982)

Test improprement appelé test de Luc Leger, ce test évalue à la fois une vitesse aérobie maximale et un V̇O2max par extrapolation. 2 plots espacés de 20 m et une bande sonore disponible sur CD Rom ou MP3 permettent de suivre les recommandations. Il s'agira de faire des allers-retours entre les 2 plots en se synchronisant sur les bips sonores émis.

Pour retrouver son $\dot{V}O_2max$:

$\dot{V}O_2$ = 31,025 + (3,238 x vitesse du palier)-(3,248 x âge)+((0,1536 x Vitesse du palier) x âge))

Les bips sont constants durant 2 minutes mais les intervalles vont ensuite se réduire en durée toutes les minutes. Cela nous force à courir de plus en plus vite jusqu'à l'épuisement.
Ce test au côté pratique ne demande effectivement que 20 m, un MP3 ou un poste. Les blocages sur le pied et les accélérations répétées fatiguent parfois musculairement. Il a tout de même servi de référence à de nombreux tests.
Attention, les vitesses du test navette correspondent à d'autres vitesses sur piste.

Tableau 6 : Correspondance entre vitesse pour les deux formes de protocole du test de Léger et coll.

EXTRAPOLATION DE LA VITESSE AÉROBIE MAXIMALE DE COURSE SUR PISTE À PARTIR DE LA CONNAISSANCE DE LA VITESSE MAXIMALE DE COURSE NAVETTE			
Course navette (km/h)	Course sur piste (km/h)	Course navette (km/h)	Course sur piste (km/h)
8,5	8,8	13,5	16,3
9	9,5	14	17
9,5	10,3	14,5	17,8
10	11	15	18,5
10,5	11,8	15,5	19,3
11	12,3	16	20
11,5	13,3	16,5	20,8
12	14	17	21,5
12,5	14,8	17,5	22,3
13	15,5	18	23

Test progressif Vam-éval de Cazorla et Léger (1993)

Test qui permet d'évaluer la vitesse aérobie maximale, d'où son nom. Bien entendu, il est possible d'en déduire un $\dot{V}O_2$max. Il peut se pratiquer sur tapis de course avec pente de 1% ou sur terrain de foot/rugby ou encore sur piste d'athlétisme.

Sur tapis de course :
Pente de 1%, départ à 8 km/h durant 1 minute 59 ; à 2 min, la vitesse est augmentée de 0,5 km/h et ceci toutes les minutes jusqu'à l'épuisement.
Il faut noter la vitesse maximale et la fréquence cardiaque maximale obtenues à la fin du test ; cette dernière doit être votre FC max réelle observée.
Nous conseillons de refaire le VAMEVAL (2 jours après le premier passage dans les mêmes conditions) afin de valider la performance.

Exemple :
- Le sportif arrête a 15 km/h avec une FC de 200 bpm.
- 6 mois plus tard, il refait 15 km/h avec une FC de 205 bpm.

Nous pouvons en déduire que la première fois, il ne s'est pas donné à fond et que de plus, il était sous-entraîné. En effet, pour refaire la même valeur que la première fois, ce sportif a dû se donner à fond cette fois physiquement. Il n'est pas possible d'augmenter la FC max par l'entraînement (hormis des pathologies et le manque d'habitude de certains sportifs à briller dans les hautes sphères de la FC). La première fois, notre sportif aurait pu faire 16.5 km/h (peut-être) s'il avait joué sa carte volonté.

Sur piste d'athlétisme :
Un plot tous les 20 m, tout autour de la piste.
Le sportif doit se caler sur les bips sonores.
Soit vous le faites pour vous, soit vous le faites faire.
Dans ce cas, un MP3 avec la bande sonore du test, un sifflet. À chaque bip dans le casque, vous sifflez ; le sportif doit courir en longeant les plots et se retrouver au passage du plot en synchronisation avec votre sifflement.

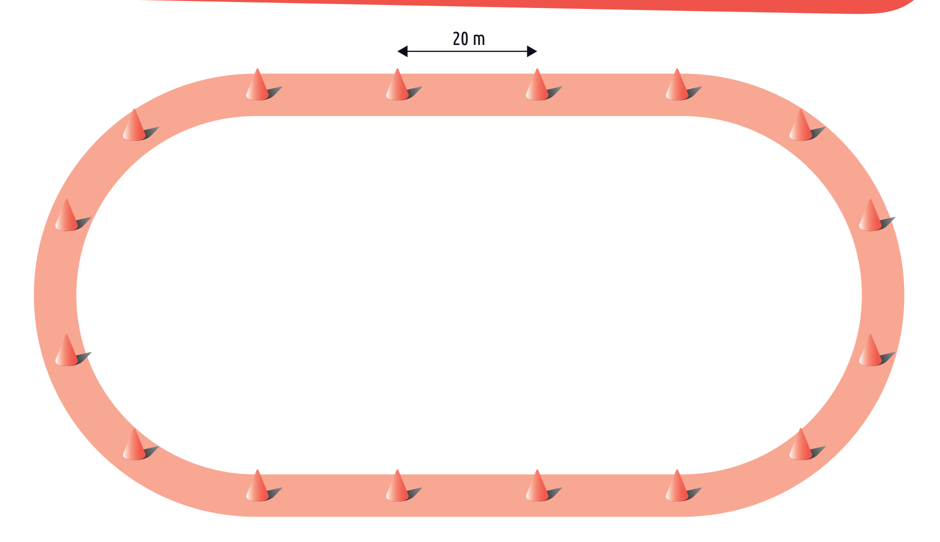


Figure 34 : Mise en place des plots dans le test VAMEVAL sur piste de 400 m

Départ à 8 km/h (c'est une marche rapide si l'on cherche une référence bien qu'il soit conseillé de trottiner). Augmentation de 0,5 km/h par palier. Une voix (celle de George Cazorla) vous annonce les paliers et non les vitesses.
Au bout de 2 min arrive le palier 1, à la troisième minute le palier 2...
Notez le palier obtenu et la FC max (en sachant que le mieux est de l'enregistrer avec une montre cardiofréquencemètre).

Exemple :
Vous vous arrêtez au palier 18, comment connaître sa vitesse ?
Le test commence 8 km/h et augmente de 1 km/h tous les 2 paliers donc
VAM = (palier obtenu : 2) + 8
VAM = (18 : 2) + 8
VAM = 17 km/h
Vous savez également que vous venez de courir 19 minutes, c'est trop long ; le test devrait durer moins longtemps afin de ne pas générer trop de fatigue et sous-estimer votre vitesse.

Refaites le test en commençant à un palier supérieur en fonction de votre performance.

Sur terrain de football ou de rugby (ou autre grand terrain plat), petit jeu de construction pour créer une piste de 200 m.

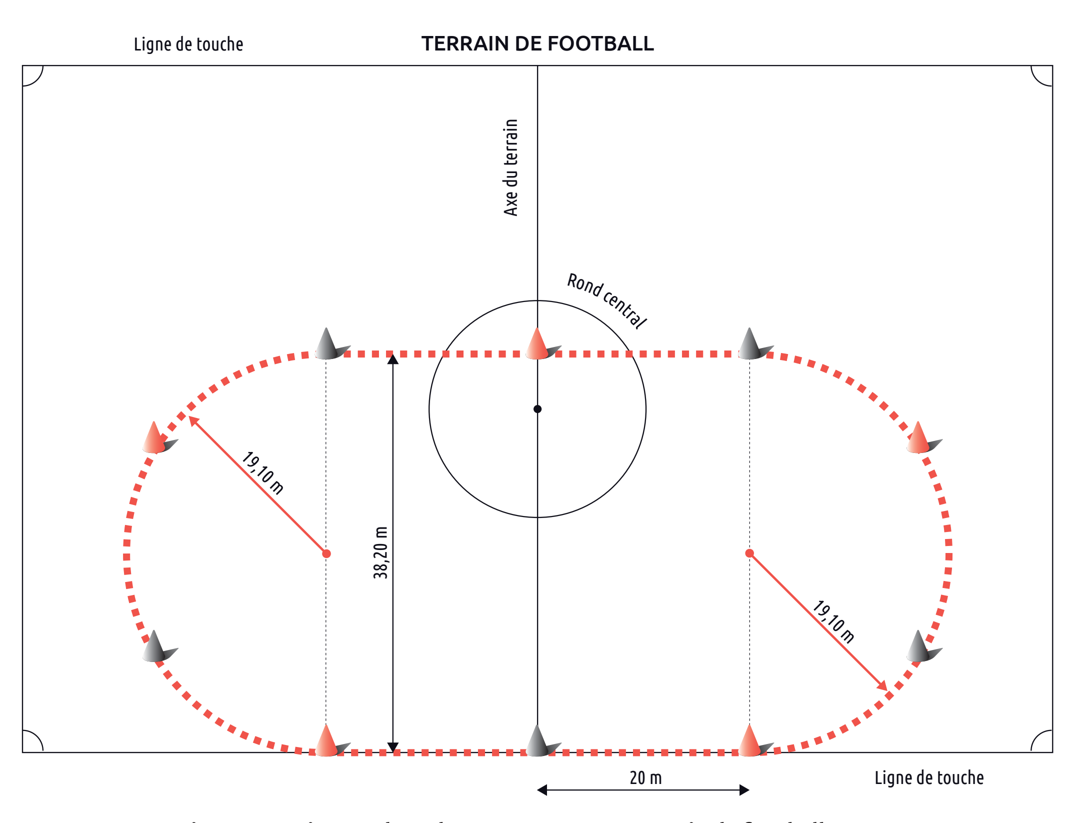


Figure 35 : Mise en place du VAMEVAL sur un terrain de football

En partant de la ligne de touche, balisez de chaque côté un plot à 20 m. Il va falloir créer 2 virages de 60 m : pour cela, matérialisez un demi-cercle de 19,10 m de rayon (et oui, calcul de primaire pour connaître le périmètre d'un cercle, son diamètre, son rayon, 2Πr, vous vous souvenez ?). Nous conseillons de planter dans le sol une attache de votre double décamètre et de tourner en lâchant un plot tous les 3 pas. Par la suite, il faut reprendre le double décamètre et ajouter un plot d'une couleur différente tous les 20 m.

Fréquence cardiaque lors d'un test VAMEVAL

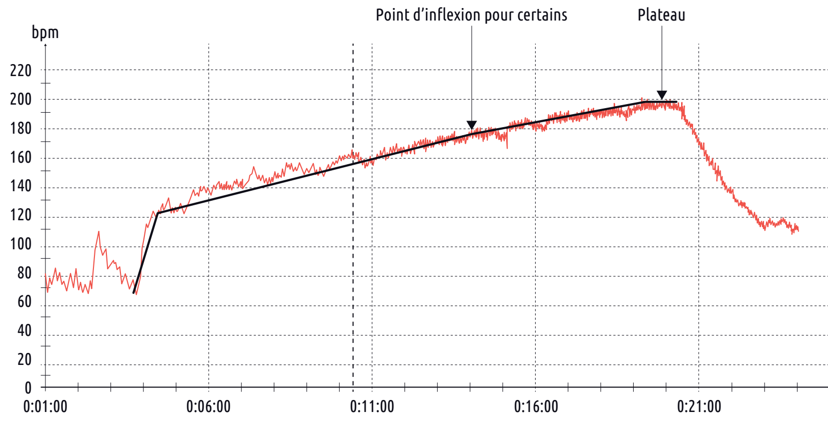


Figure 36 : Exemple d'enregistrement de la FC lors d'un test VAMEVAL

Valeur de curseur
Temps : 0:10:33:4
FC : 160 bpm

Tableau d'évaluation au test Vam-Eval			
Palier	15 s	30 s	45 s
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			

Nom ou numéro	Prénom	Palier obtenu	VAM FC max

Protocole du test : à chaque Bip, les évalués doivent ajuster la vitesse en se trouvant exactement au niveau d'une des bornes de repères placées tous les 20 mètres sur la piste. Après un ou deux tours, l'ajustement doit être fait. Un retard d'un ou deux mètres est toléré jusqu'à ce que l'athlète n'arrive plus à rattraper son retard.
Lors de l'arrêt du test, veillez à ce que l'athlète ne reste pas sur le tracé de la piste afin de ne pas gêner les autres participants.
Enfin, notez son palier.

➔ Autre test sur tapis

Exemple du test de Brue sur Tapis :

Palier	Vitesse	Durée	VO²max	F.C
Échauff...	5	5'	17,55	
1	6,5	30"	22,82	
2	6,8	30"	23,87	
3	7,1	30"	24,92	
4	7,4	30"	25,97	
5	7,7	30"	27,03	
6	8	30"	28,08	
7	8,3	30"	29,13	
8	8,6	30"	30,19	
9	8,9	30"	31,24	
10	9,2	30"	32,29	
11	9,5	30"	33,35	
12	9,8	30"	34,40	
13	10,1	30"	35,45	
14	10,4	30"	36,50	
15	10,7	30"	37,56	
16	11	30"	38,61	
17	11,3	30"	39,66	
18	11,6	30"	40,72	
19	11,9	30"	41,77	
20	12,2	30"	42,82	
21	12,5	30"	43,88	
22	12,8	30"	44,93	
23	13,1	30"	45,98	
24	13,4	30"	47,03	
25	13,7	30"	48,09	
26	14	30"	49,14	
27	14,3	30"	50,19	
28	14,6	30"	51,25	
29	14,9	30"	52,30	
30	15,2	30"	53,35	
31	15,5	30"	54,41	
32	15,8	30"	55,46	
33	16,1	30"	56,51	
34	16,4	30"	57,56	
35	16,7	30"	58,62	
36	17	30"	59,67	
37	17,3	30"	60,72	
38	17,6	30"	61,78	
39	17,9	30"	62,83	
40	18,2	30"	63,88	
41	18,5	30"	64,94	
42	18,8	30"	65,99	
43	19,1	30"	67,04	
44	19,4	30"	68,09	

Protocole du test TPMA
(test de Brue sur tapis roulant)
Test progressif maximal aérobie (TPMA)

Conditions :
Le test TPMA est un test triangulaire maximal qui doit être proposé à des sujets entraînés ne présentant aucune contre-indication à un effort de cette intensité. Test de course à pied, il se déroule sur tapis roulant étalonné.

Échauffement :
5 minutes à 5 km/h.

Incrémentation :
À partir de 6,5 ou 8 km/h suivant le niveau initial du sujet et augmentation progressive (incrémentation...) de la vitesse du tapis de 0,3 km/h toutes les 30".
La vitesse est augmentée jusqu'à la performance maximale du sujet.
Le relevé des fréquences se fait à la fin de chaque palier (toutes les 30").
La récupération se fait en marche à 5 km/h et peut donner lieu à un relevé de fréquences afin d'analyser la capacité de récupération du sujet.

Le testeur devra être tout à fait vigilant à l'attitude du sujet pendant le test afin de prévenir tout risque éventuel.

Les conditions de passation du test devront satisfaire aux exigences de sécurité et de reproductibilité.
Ce test permet de déterminer la Vitesse Aérobie Maximale ou VAM et d'estimer le $\dot{V}O_2$max.

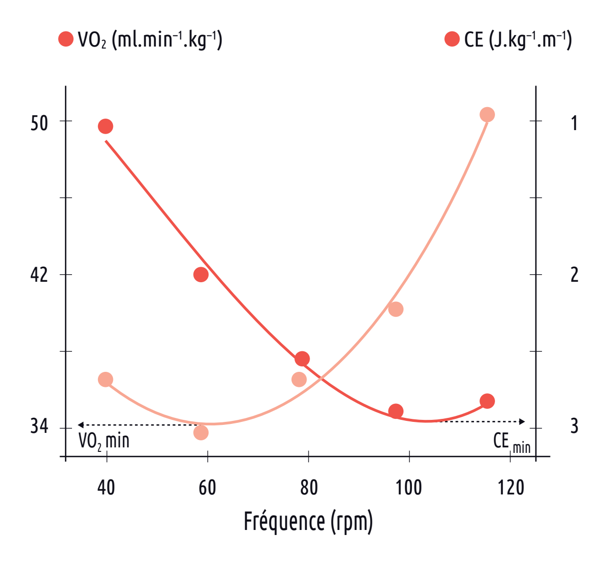
Tests maximaux sur vélo ergomètre

Test 1 "rapide" pour "tous" :

Les tests sur vélo muni d'ergocycle sont faciles à exécuter en salle de fitness ; voici une procédure pour évaluer votre $\dot{V}O_2$max que nous exécutons.

Trouver la bonne cadence (60 RPM ou rotation/révolution par minute), commencer à 20 watts de résistance durant 2 minutes puis augmenter de 25 watts par minute. L'impossibilité de maintenir la cadence détermine l'arrêt de l'effort et la puissance en watt associée. Il faut ensuite convertir la puissance aérobie maximale en $\dot{V}O_2$max si souhaité.

La cadence est entre 50 et 90 RPM selon votre niveau et aisance sur un vélo. La figure 37 aide à comprendre le rapport entre la vélocité de pédalage et l'économie de course. 80 RPM semble un optimum même si certains se sentent à l'aise à 90.



Exemple :

Sportif de 85 kg, 30 ans, qui se sent à l'aise sur une cadence de 70 RPM (qu'il devra mémoriser afin de reproduire le test dans les mêmes conditions).

Figure 37 : Relation entre $\dot{V}O_2$max et CE adapté de la figure dans *"Cyclisme et optimisation de la performance"* par Frédéric Grappe.

- 2 minutes à 20 watts ;
- puis augmentation de 25 watts par minute ;
- il augmente durant 14 minutes soit 350 watts de plus ;
- PAM = 350 + 20 ;
- PAM = 370 watts.

Formule de Haw-Ley pour passer de la PAM au $\dot{V}O_2max$

$\dot{V}O_2max$ absolu = 0.01141 x PAM + 0.435
= 0.01141 x 370 + 0.435
= 4.2217 + 0.435
= 4.6567 l/min

Formule pour passer du $\dot{V}O_2max$ absolu en $\dot{V}O_2max$ relatif

Pour remettre en ml/min/kg :
$\dot{V}O_2max$ **relative en ml/min/kg** = $\dot{V}O_2$ (**l/min**) **absolu** x 1000 : poids kg
= 4.6567 x 1000 : 85
= 54.78 ml/min/kg

Nous pourrions presque par calcul estimer sa VAM en effectuant :

VAM = $\dot{V}O_2max$: 3.5
= 54.78 : 3.5
= 15.65 km/h

Bien comprendre la fragilité de ce type de raisonnement de passer d'un test sur ergocycle à l'extrapolation de la VAM. Ceci peut être considéré comme un repère et nullement comme une valeur fiable.

L'avantage de cette formule est de passer d'une valeur de VAM à une PAM.
Exemple : Sportif de 75 kg avec une VAM à 15.5 km/h
Pour rappel, $\dot{V}O_2max$ absolu en l/min et PAM en watts

Pour passer de la VAM au $\dot{V}O_2max$
$\dot{V}O_2max$ = VAM x 3.5
= 15.5 X 3.5
= 54.25 ml/min/kg

Pour retrouver la PAM, il faut changer le $\dot{V}O_2$ absolu en $\dot{V}O_2$ relatif.
$\dot{V}O_2$ (**l/min**) **absolu** = $\dot{V}O_2max$ **relatif ml/min/kg** x Poids kg : 1000
= 54.25 x 75 : 1000
= 4.06875 l/min

$$\begin{aligned} PAM &= (\dot{V}O_2max\ absolu - 0.435) : 0.01141 \\ &= (4.06875 - 0.435) : 0.01141 \\ &= 3.63375 : 0.01141 \\ &= 318.47\ watts \end{aligned}$$

Un sportif coureur blessé qui voudrait limiter les impacts et s'entraîner sur vélo pourrait utiliser cette manière de faire pour estimer son 100 %.

Test 2 : protocole de la fédération de cyclisme

Pédaler avec une cadence libre en commençant à 100 watts durant 2 minutes. L'incrémentation est de 30 watts toutes les 2 minutes.
Test maximal, lorsque la fréquence ne peut plus être maintenue à 70 RPM, il est à noter le temps pratiqué dans le palier afin de déterminer la puissance maximale par la méthode de Hawley et Noakes.
Ppic (W) = puissance du palier terminé (W) + (temps du dernier palier (s)/ temps du palier (s)) x incrément (W). Si le temps maintenu est inférieur à 10 secondes, il faut prendre en compte le dernier palier.

Pour en finir avec les tests maximaux, nous ne mesurons que le $\dot{V}O_2$max du sportif. Il manque une évaluation de l'endurance aérobie. Si le $\dot{V}O_2$max était une mesure absolue prédictive de la performance, il suffirait d'évaluer cette qualité physique aux Jeux olympiques, il y aurait un gain de temps. Chaque discipline recèle ses tests spécifiques.
Finalement, chaque préparateur physique devrait pouvoir comprendre qu'un test maximal est une manière d'atteindre son maximum avec une progression permettant une adaptation optimale de l'organisme. Les protocoles axés sur les km/h ont de bons résultats avec 1 km/h toutes les 2 minutes et les protocoles avec watts préfèrent les incrémentations de 30 à 50 watts toutes les 2 minutes. Donc même si nous n'avons pas exprimé le travail sur elliptique ou rameur-ergomètre, vous devriez pouvoir faire votre propre protocole.

Pour la course à pied, bien que critiqué, nous utilisons le test de Véronique Billat du temps limite à $\dot{V}O_2max$ afin de déterminer l'endurance au $\dot{V}O_2max$.
Protocole :
Il est préférable de faire ce test sur tapis de course avec une pente de 1% ; 20 minutes à 60% de VAM.
Dans les 20 dernières secondes de l'échauffement, augmenter la vitesse jusqu'à 100% de la VAM puis maintenir le plus longtemps possible.
Les écarts peuvent être de 3 à 9 minutes.
Il est possible d'améliorer ce temps de maintien sans augmenter son $\dot{V}O_2max$.

Pour terminer, chaque test possède ses propres caractéristiques, il est important de bien spécifier la VAM en fonction du test. Ma VAM est de tant sur ce test, ou mon $\dot{V}O_2max$ est de x avec ce protocole, en exemple ci-dessous, des VAM obtenues en fonction de différents protocoles.

	Léger - Boucher	Vam-éval	Vam extrapolée	TUB II	Brue
Vam	17,2	17,3	17,32	17,4	17,8
km/h-1	± 1,1	± 1,1	± 0,96	± 1	± 0,9

L'optimisation de la performance, connaître les méthodes

Définitions utiles adaptées de G.Cazorla

Le détail des bénéfices des intensités de travail est donné plus loin.
La capacité aérobie représente la quantité totale d'énergie potentielle susceptible d'être fournie par voie oxydative dépendante des réserves totales de substrats utilisables (ou "carburant" de l'organisme) : glycogène, glucose circulant, acides gras libres, voire même dans certaines circonstances, acides aminés... La capacité à transporter et utiliser l'oxygène est directement une limite. L'entraînement de la capacité est ce que nous appelons l'endurance fondamentale du début de saison. *L'aisance respiratoire reste la limite entre la capacité et la puissance, la dyspnée (essoufflement) reste le repère de terrain. Il faut être capable de parler durant le travail de capacité.*

La puissance aérobie maximale (P.A.M.) est la quantité maximale d'oxygène qu'un organisme peut utiliser *par unité de temps* (généralement par minute) au cours d'un exercice musculaire intense et d'une durée égale ou supérieure à 3 minutes. Elle correspond au $\dot{V}O_2$max. En plus rapide : Énergie musculaire fonctionnelle exprimée en watts à $\dot{V}O_2$max.

Les exercices continus correspondent à la pratique sans interruptions et la plupart du temps à de la course, vélo, nage de longue durée, supérieure à une heure.

Le fartlek est un mot qui provient de l'athlète Suédois Gösta Holmer (1891-1983) et qui signifie jeu de vitesse (fart : vitesse, et lek : jeu). Cette variation d'allure est intuitive. Il s'agit d'aller courir en dehors du stade (culturellement) pour continuer le développement du travail aérobie. Sur une course de 50 minutes, il est possible de s'accorder 10 à 30 secondes d'accélération toutes les 3 minutes ou de se fixer, sur la route, des objectifs comme courir entre 5 poteaux téléphoniques à allure moyenne puis entre les 2 prochains à allure rapide.
Ce système prépare au travail d'interval-training, il n'est pas normé d'après des tests, il doit laisser le sentiment d'être capable de faire plus !

Interval-training ou IT, intermittent et fractionné : il y a toujours de l'ambiguïté sur ces 3 termes pour tous les professionnels. Il y a deux positions à statuer : soit nous partons du principe que cela est le même travail et que seule la richesse de la langue française a apporté cette confusion, soit nous proposons ces définitions que nous avons toujours utilisées sur le terrain ou en formation. Mais la pratique de terrain se passe aisément d'une définition des termes. Ce que tous les préparateurs physiques ont compris, c'est l'intérêt de ce type de travail : augmenter le temps passé à intensité plus élevée et stresser davantage l'organisme. On sait aujourd'hui qu'il est possible d'utiliser les IT pour de la rééducation cardiaque avec des pourcentages d'intensités plus ou moins élevés de $\dot{V}O_2$max, pour varier l'entraînement d'un sportif, pour la perte de poids...

Famille de l'interval-training
L'interval-training est un travail alternant des phases intenses et des phases de relâchement (effort et contre-effort). Il peut prendre différentes formes comme un effort de 2 minutes avec récupération de 3 minutes.

Les exercices par intervalles courts ou exercices intermittents courts, type "15-15" : 15 s de course-15 s de récupération. La compréhension des effets physiologiques des exercices intermittents de courte durée fait essentiellement appel à la connaissance des interactions possibles entre l'exercice court et la récupération courte (Saltin et Essen, 1971).

Intermittent : forme de travail ayant un effort et une récupération identiques comme 2 minutes d'effort et 2 minutes de récupération (passive ou active) ou le fameux 30/30.

Les exercices par intervalles longs : les exercices de plus d'une minute peuvent rentrer dans cette catégorie. Lorsque l'effort est supérieur à 10 minutes, les répétitions deviennent rares. Nous sommes en droit de nous demander l'intérêt de l'exercice, n'est-ce pas plutôt un fractionné ?

Les exercices par intervalles courts : les efforts de moins d'une minute rentrent dans cette définition. Les intensités ont tendance à être élevées (de 105 à 120 % de la VAM).

Les fractionnés : étymologiquement "fractionné" provient du mot fraction et la fraction est ce qu'il reste d'une division. Il faut partir de deux principes généraux : soit je décide de diviser une distance de l'effort total, soit je décide de diviser le temps d'effort prévu.

Exemple 1 :

- Je ne suis pas capable de parcourir un 10 km en continu, mais je décide de le faire en fraction. 10 000 m en 5 parties = 2 000 m ; 2 000 m avec récupération de 3 minutes, le tout que je répète 5 fois.
- Je suis capable de courir un 10 km en continu, mais je décide de le faire à intensité plus élevée.

Exemple 2 :

- Je sais que mon effort est de 40 minutes, mais je décide de m'entraîner par alternance de 10 min d'effort et de 5 minutes de récupération afin de mettre davantage d'intensité.

Des méthodes

Tableau 7

Récapitulatif des effets de l'intensité de l'entraînement sur les facteurs de la performance (adapté de F. PERONNET et P. COE)

% de VMA	Effet sur			Type de séance	Adaptations physiologiques
	Capacité anaérobie	VMA	Endurance		
110	Très élevé	Très élevé		VMA	Développement fibres ST et FT Augmentation recrutement fibres Amélioration capacité bufférisation du sang Augmentation enzymes glycolytiques
105	Très élevé	Très élevé		VMA	
100	Élevé	Très élevé		VMA	
95	Moyen	Élevé	Moyen	VMA	
90	Faible	Moyen	Élevé	Endurance intermittente	Développement fibres ST et Fta Augmentation volume d'éjection systolique Augmentation enzymes oxydatifs et glycolytiques
85		Faible	Très élevé	Endurance intermittente et continue	
80			Élevé		
75			Faible	Continue longue et continue facile	Développement fibres ST Augmentation des réserves énergétiques Augmentation des capillaires Augmentation du volume du sang
70					
65				Échauffement	
60				Récupération	

EXERCICE		RÉCUPÉRATION		IMPACTS PHYSIOLOGIQUES
Intensités	Durées	Nature	Durées	Endurance aérobie
70 à 15 % VAM	20 min	–	–	
65 à 70 % VAM + accélérations pendant 10 s toutes les 2 min de course	20 min	Active (fartlek)	–	Endurance aérobie + PAM
85 à 95 % VAM	6 min x 3	Passive	1 min x 2	PAM + Capacité Lactique
100 % VAM	2 min x 4	Passive	3 min x 4	Capacité lactique + PAM
110 à 120% VAM	15 s x 40	Passive	14 s x 40	Puissance aérobie Maximale

Synthèse par filières énergétiques

L'anaérobie alactique : nous n'aimons pas forcément cette approche qui nous laisse à penser que nous maîtrisons la biochimie de l'entraînement. Mais cette forme plaît, aussi, nous la proposons en l'adaptant des propositions de M. Pradet.

Tableau 8A

Intensité de l'effort	Durée de l'effort	Durée de la récupération	Nature de la récupération	Quantité de travail
Capacité du processus alactique				
Vous offrez le maximum sur la durée proposée	De 7 à 15 s	De 3 à 8 minutes en fonction de la durée des efforts, 3 min pour 7 secondes, ou 8 minutes pour 15 secondes	Passive si 3 min, active si supérieur pour ne pas se refroidir	De 4 à 6 répétitions. Interrompre le travail dès qu'apparaît une baisse trop marquée de l'intensité
Puissance du processus alactique				
Vous offrez le maximum sur la durée proposée	De 3 à 7 s	De 1 à 3 minutes en fonction de la durée des efforts	Passive, récupération optimale	De 6 à 12 répétitions. Interrompre le travail dès qu'apparaît une baisse de l'intensité

L'anaérobie lactique :

Tableau 8B

Intensité de l'effort	Durée de l'effort	Durée de la récupération	Nature de la récupération	Quantité de travail
Capacité du processus lactique				
Vous offrez le maximum sur la durée proposée	De 30 s à 2 min	De 3 à 8 minutes	Active (marche, proprioception)	4 à 6 répétitions
Puissance du processus lactique				
Vous offrez le maximum sur la durée proposée	De 15 à 30 s avec possibilité de fractionner la durée	De 1 à 3 minutes entre chaque fraction et de 5 à 30 minutes entre chaque série	Passive	Difficile à prévoir, 4 semblent un minimum, la fatigue est parfois de trop sur ce genre d'exercice Expérimenter et adapter

L'aérobie :

Tableau 8C

Intensité de l'effort	Durée de l'effort	Durée de la récupération	Nature de la récupération	Quantité de travail
Capacité du processus aérobie : endurance fondamentale				
Autour de 60-70 % de la PMA	De 30 minutes à 1 heure	Aucune	Étirement, diététique adaptée	3 fois par semaine
Capacité du processus aérobie : efforts continus d'intensité élevée				
Vous offrez le maximum sur la durée proposée. Un repère, 85 % de la VAM	De 20 à 40 minutes	Aucune	Étirement, diététique adaptée	2 fois par semaine + une fois en capacité
Puissance du processus aérobie : efforts continus				
80 à 100 % de la VAM	Comprise entre 4 et 6 minutes quand on se mobilise vers environ 100 % de PMA et 20 à 30 minutes quand l'intensité diminue	Normalement pas de récupération, mais s'adapter à l'effort.		
Puissance du processus aérobie : IT de longue durée				
Compris entre 95 et 110 % de la PMA	De 1 à 3 minutes	De 2 à 3 minutes Alternance de durées d'effort et de récupération identiques	Active, pour maintenir une valeur FC "élevée"	5 à 6 répétitions au minimum
Puissance du processus aérobie : IT de courte durée				
Compris entre 105 et 120 % de la VAM ou de la PAM	De 10 s à 1 minute	De 10 s à 1 minute La récupération peut être plus longue	Passive	Pour une séance entièrement organisée autour de cette méthode, 12 à 15 répétitions au minimum
Puissance du processus aérobie orientée vitesse : IT de courte durée				
maximale	5 à 10 s	25 ou 50 s	passive	Ne pas attendre que la fatigue soit importante, l'anticiper ou l'obtenir une fois afin de ne plus réitérer la même quantité

Autre tableau plus général :

Tableau 9

Méthode	Objectif	Intensité	Volume
Endurance continue lente	Dépenser de l'énergie	65 à 75 % de la VAM (V02max)	30 minutes à 2 heures
Endurance continue rapide	Développer l'endurance aérobie	80 à 85 % de la VAM	20 à 40 minutes
L'endurance intermittente	Développer l'endurance aérobie	85 à 90 % de la VAM	3 à 15 minutes 2 à 8 réps (20 à 40 min) Récup. 50 à 100 % de la durée de l'effort
La PMA intermittente	Développer $\dot{V}O_2max$	100 à 110 % de la VAM	10 à 60 s Récup. Durée de l'effort
Le 30/30 classique	Développer $\dot{V}O_2max$	105 à 130 %	(30 s x 6 à 12 min) x 3 Récup : 6 min
La PMA intermittente	Développer $\dot{V}O_2max$ Travaille également la cinétique de $\dot{V}O_2max$	95 à 100 % de la VAM	1 à 3 minutes Récup. 1 à 2 fois la durée de l'effort (3 x 3 minutes) x 2 ou x 3 Récup : 6 min
Orientation $\dot{V}O_2max$	Idem dominante $\dot{V}O_2max$	100 % 97,5 % 95 %	10 x 1 minute Récup 1 minute 6 x 2 minutes Récup 2 minutes 6 x 3 minutes Récup 3 minutes
Orientation Cinétique	Idem dominante cinétique	105 % 100 %	10 x 1 minutes Récup 2 minutes 6 x 2 minutes Récup 4 minutes
Endurance au $\dot{V}O_2max$	Le développement du $\dot{V}O_2max$ seul ne suffit pas	100 à 130 %	30 s x 15 à 20 rép récupération de 30 s
Méthode par répétitions	S'habituer aux allures de compétitions	Celle de la compétition	10 à 30 % de la compétition (10 % pour les marathonien) Récupération complète, parfois 4 fois durée de l'effort

Distance de compétition (mètres) minimum	Fraction d 'effort maximum
3000	200
800	
5000	400
1000	
10000	600
2000	
21100	1000
3000	
42195	2000
5000	

Un développement de l'interval-training, de l'intermittent, du fractionné

Au début du XXe siècle, nous avons parlé de l'athlète suédois Gösta Holmer avec son Fartlek (course intuitive), mais l'athlète finlandais ingénieur de formation Paavo Nurmi (vers 1920) a contribué au développement des entraînements rigoureux et intenses (des IT, des fractionnements de distances...). Les années 30 virent l'apparition des méthodes inventées pour les patients coronariens à la performance. Reindell (cardiologue) et Gerschler (entraîneur universitaire, tous deux allemands), par leur collaboration, vont arriver à la conclusion que le muscle cardiaque est mieux préparé sous la forme d'un travail entrecoupé de pauses (de la musculation du cœur).
Mais c'est au final Emil Zatopek, grand champion d'endurance, qui va populariser l'intermittent. En 1948, lors des Jeux de Londres, il prouve au grand public l'efficacité de son entraînement controversé en remportant la médaille d'or sur le 10 000 m devant le Français Alain Mimoun. Un an plus tard, il établit un nouveau record du monde sur cette même distance.
En 1951, il devient le premier homme à franchir la barre des 20 kilomètres parcourus dans l'heure (20,052 km). Il fut également le premier homme à descendre sous les 29 minutes sur 10 000 m.
Mais Zatopek, surnommé la "locomotive", réalise son plus grand exploit aux J.O. d'Helsinki en 1952, remportant un triplé historique : 5 000 m et 10 000 m, marathon, performance inégalée.
Un exemple de séance : 20 x 400 m en 1'15 sur une seule ligne.
Nous vous conseillons la lecture de la biographie d'Emil Zatopek.

Pour comprendre l'intermittent, regardons la littérature :

En 1977, Essen et al. ont comparé des efforts 15 – 15 (15'' à 100 %) avec un effort continu correspondant à la même intensité (50 %). Les taux de lactates demeurent identiques pour une période d'effort de 1 heure. Cependant, alors que les taux de PCr et ATP restent relativement stables dans l'effort continu, les valeurs fluctuent pendant l'exercice intermittent.

Après 5’ d’effort, à la fin d’une période de 15’’, le taux de PCr représente 40 % de la valeur de repos, et 70 % à la fin des 15’’ de récupération. Les auteurs indiquent également une modification du type de fibres recrutées.

Edgerton et coll. (1978) et Essen (1978) indiquent que les fibres lentes sont majoritairement recrutées pendant l’effort continu alors que les fibres lentes et rapides sont recrutées pendant l’effort intermittent.

Essen (1978) indique également que pour un effort correspondant à 100% de $\dot{V}O_2max$, en continu, les sujets sont épuisés en quelques minutes, alors qu’ils peuvent soutenir une heure d’effort en 15 – 15. L’auteur indique une accumulation plus importante de lactate et un taux d’utilisation plus élevé de glycogène pendant l’effort continu alors que le taux d’utilisation des lipides est plus élevé pendant l’intermittent. Pendant l’intermittent, la contribution plus importante des processus aérobie serait due à la réserve d’O_2 de la myoglobine.

Christenssen et al. (1960) remarquent que pour des intensités supérieures à $v\dot{V}O_2max$, les intermittents courts peuvent être réalisés sans production de lactate excessive du fait de la décharge d’O_2 de la myoglobine pendant l’effort et de sa recharge pendant la récupération.

Manno (1992) ➞ Si l’intensité dépasse 90 % de VMA, les fibres rapides se trouvent également sollicitées (++ qualité).

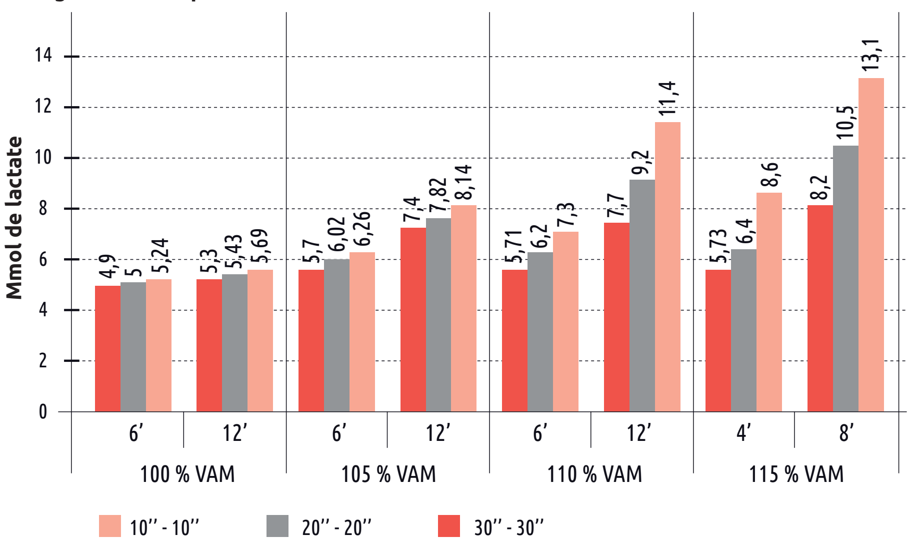
Essen (1978) ➞ Les fibres lentes sont majoritairement recrutées pendant l’effort continu alors que les fibres lentes et rapides sont recrutées pendant l’effort intermittent.

Idir et coll. (2001) ➞ Meilleure répartition de la fatigue pendant l’intermittent.

Fox et Mathews indiquent que l’on dispose de 11,2 ml/kg d’O_2 dans la myoglobine, soit pour un sujet de 70 kg (15 kg de muscle), 168 ml d’O_2, ce qui n’est pas négligeable.

Bisciotti (2001) a fait réaliser 3 différents types d´intermittent (10 – 10 ; 20 – 20 ; 30 – 30 avec récupération passive) à 4 intensités différentes (100 – 105 – 110 – 115 % de la VAM).

Figure 38 : Comparaison de 3 formes de travail intermittent à 4 intensités différentes



100 % VAM	10'' - 10''	aérobie
	20'' - 20''	aérobie
	30'' - 30''	aérobie
105 % VAM	10'' - 10''	anaérobie faible
	20'' - 20''	anaérobie faible
	30'' - 30''	anaérobie faible
110 % VAM	10'' - 10''	anaérobie faible
	20'' - 20''	anaérobie
	30'' - 30''	très anaérobie
115 % VAM	10'' - 10''	anaérobie
	20'' - 20''	fortement anaérobie
	30'' - 30''	fortement anaérobie

Citons Georges Cazorla :

> "L'exercice intermittent bref à haute intensité est une forme très particulière d'exercice intermittent. Pour cet exercice, la resynthèse de l'adénosine tri-phosphate (ATP) s'effectue principalement par le métabolisme anaérobie lors des premières répétitions. La très courte phase de récupération permet alors de resynthéthiser une partie des réserves de phosphagènes et de ré-oxygéner en partie la myoglobine et l'hémoglobine.
> Lorsque l'exercice se prolonge, la contribution du métabolisme aérobie s'accroît au fur et à mesure des répétitions (Gaitanos et al, 1993 ; Balsom et al, 1994a, 1994b). Il s'agit donc d'une forme d'exercice qui va solliciter significativement à la fois le métabolisme anaérobie et le métabolisme aérobie des sujets."

Les exercices intermittents et la puissance aérobie

En synthèse, nous pourrions regarder l'intermittent avec ce tableau :

Tableau 10 : Synthèse des 3 formes de travail intermittent court

Intermittent	Réserve en O_2 (Myoglobine)	PCr	Récupération en O_2	Récupération en PCr	Glycolyse	Filière principale
10/10	Épuisement ou pas	Baisse	limite	Insuffisante	Peu	Aérobie
15/15	Épuisement	Baisse importante	complète	Insuffisante	Peu	Aérobie
30/30	Épuisement	Épuisement	complète	Moyenne	Importante	Aérobie et anaérobie

10/10 : baisse en myoglobine et PCr, la récupération recharge la myoglobine, les réserves en PCr sont entretenues par l'O_2
= aérobie
15/15 : Idem + et légère glycolyse
= aérobie
30/30 : épuisement de la myoglobine et de la PCr, participation importante de la glycolyse, les 30 s de récupération rechargent la myoglobine et pas suffisamment la PCr, l'aérobie est surtout présente lors de la récupération
= mixte capacité anaérobie et puissance aérobie.

Cette logique est dépendante de l'intensité de l'exercice !

Figure 39 : Exemple de séances d'intermittent avec enregistrement de la FC. Chaque séquence est d'une durée de 6 minutes. Le nombre de répétitions est donc fonction de cette durée totale.

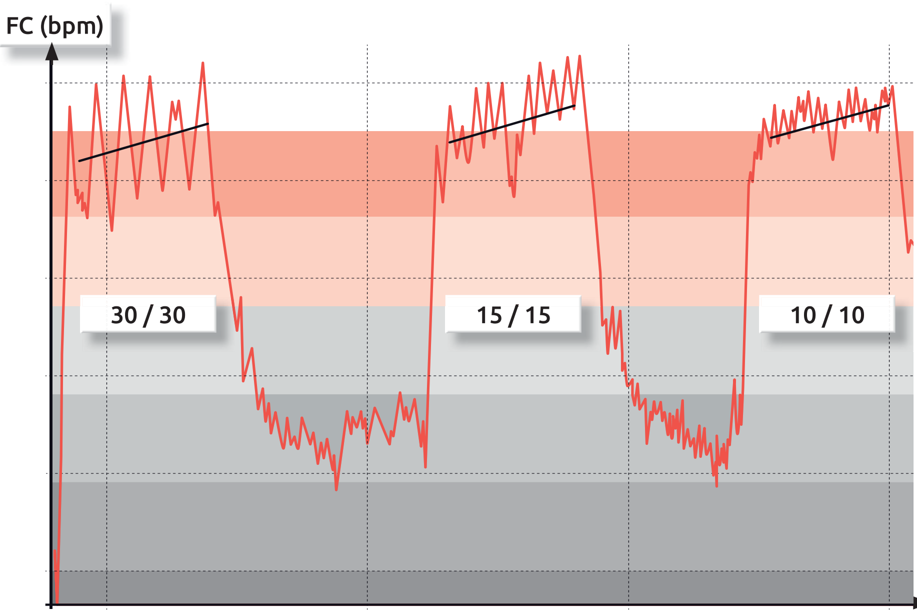


Tableau 11 : Synthèse des formes de récupération physiologiques

Reconstitution des réserves	Récupération complète		Récupération incomplète (*)	
	Nature	Durées	Nature	Durées
Oxygène	Passive	10 à 15 s	Passive	10 à 15 s
ATP-PCr	Passive	6 à 8 minutes	Passive	1.30 à 2 minutes
Glycogène	Passive	12 à 48 heures	Passive + augmentation de l'apport en glucide	24 heures
Métabolisme du lactate	Passive	1h30	Passive	30 à 45 minutes
	Active	20 minutes	Active	6 à 8 minutes
(*) : Compatible avec la reprise d'activités physiques d'intensité élevée				

Complément :

Récupérations entre les séances d'entraînement
Endurance de moyenne durée à 70% de VMA : 12 heures de récup.
Endurance de longue durée (1h30' à 2 h) à 70% de VMA : 48 h.
Endurance à 80% de VMA : 24 à 48 h.
VMA courte et **longue** : 24 à 48 h et **48 à 72 h.**

Les exercices intermittents, logiques pour la pratique

Si Saltin et coll (1976) avaient proposé une classification pour décrire les IT à partir de 3 critères (intensité, ratio et amplitude), nous en proposons une plus complète :

- ratio ;
- intensité de l'effort ;
- intensité de la récupération (récupération active ou passive) ;
- durée de la période d'effort ;
- durée de la période de récupération ;
- amplitude ;
- nombre de séries et répétitions.

Nous nous servirons des calculs de l'auteur pour l'intensité moyenne et l'amplitude.

Ratio :

Le ratio est le rapport entre la période d'exercice et celle de récupération.

- Puissance aérobie :
  - Un IT de 30 s d'effort et de 30 s de récupération donne, 30 : 30 = 1. Ratio 1.
  - Un IT de 30 s d'effort et de 15 s de récupération donne, 30 : 15 = 2. Ratio 2.
- Puissance anaérobie et vitesse :
  - Un IT de 10 s d'effort et de 20 s de récupération donne, 10 : 20 = 0,5. Ratio 0,5.
  - Un IT de 5 s d'effort et de 25 s de récupération donne 5 : 25 = 0,2. Ratio 0,2.

Si le ratio 1 semble populaire, nous préconisons de tendre vers le ratio 2.

Augmenter l'intensité de l'exercice est parfois impossible et diminuer la récupération est en revanche une belle forme de stress sur le sportif.

Intensité :
Par rapport à la VAM ou à la PAM, il faut donc passer par un test maximal. L'utilisation de la fréquence cardiaque (FC) n'est d'aucune aide pour les IT courts et très intenses. La **dérive pulsatile** est un phénomène connu : à vitesse constante durant une longue période, la FC augmente et peut atteindre FCmax. La gestion de la température corporelle (thermorégulation) et les pertes hydriques expliquent en partie le phénomène. Il est donc possible d'atteindre son $\dot{V}O_2$max par cette forme de travail (c'est ce que l'on nomme la composante lente de $\dot{V}O_2$max). L'utilisation du cardio fréquencemètre est donc utile au début de l'exercice. Par la suite, c'est l'allure qui doit être votre guide par la vitesse au tour sur une piste ou la vitesse du GPS (Garmin® propose des montres pratiques).
Comme vous le verrez dans une courbe de FC en IT, la FC est en mouvement permanent, vous ne pourriez pas regarder votre FC et courir, de plus, il n'est pas possible de normer. L'intensité que nous trouvons idéale pour des IT de moins de 1 minute est 120 %. Pourquoi ce choix ? Il est à la fois pratique et en référence à la capacité de maintenir un IT. Nous en donnons les explications détaillées page 155.

Saltin proposait de calculer l'intensité moyenne de l'exercice de la sorte :

Pour un 30/30 à 120 % de la VAM avec récupération passive (0 % de la VAM) ; (120 + 0) / 2 = 60 %.
Pour un 30/30 à 120 % de la VAM avec récupération active (50 % de la VAM) ; (120 + 50) / 2 = 85 %.
Pour un 30/15 à 120 % de la VAM avec récupération passive (0 % de la VAM) ; (120 x 2 + 0) / 3 = 80 %.
Pour un 30/15 à 120 % de la VAM avec récupération active (50 % de la VAM) ; (120 x 2 + 50) / 3 = 96,7 %.
Cela reste un moyen mathématique de rendre compte de la difficulté d'un IT, le dernier étant intuitivement peu praticable sans calcul.

Durée de la période d’effort :
Elle est fonction de votre choix ou de l’objectif.
Des durées de 2 minutes semblent adaptées au développement de $\dot{V}O_2max$; mieux, la moitié du temps limite serait optimale.
Pour les sports collectifs ou les sports avec fortes sollicitations anaérobie, préférez les IT de moins de 1 minute. Explications détaillées page 159.

Intensité de récupération :
La récupération passive permet de mieux récupérer de la myoglobine (transporteur d’oxygène dans le muscle) et d’augmenter le volume d’entraînement, mais la récupération passive "provoque" moins de stress, la séance est moins intense.

Une récupération à 50% de la VAM (proche du seuil ventilatoire 1) provoque une stabilisation de $\dot{V}O_2max$, la FC et la ventilation restent à 90%. Le temps passé à $\dot{V}O_2max$ semble plus important (c’est l’objectif recherché).
La consommation d’énergie est également plus importante ; c'est donc une séance à éloigner d’une compétition.

Pour les IT de moins de 30 s (et surtout moins de 15 s), nous préférons les récupérations passives car le temps d’exercice est plus long, la resynthèse de la PCr plus importante, la disponibilité en O_2 plus importante et le débit sanguin est plus important dès l’arrêt de l’exercice.

Durée des récupérations :
La durée est dépendante de l’exercice. Nous proposons une plage allant de la moitié de la durée de l’effort jusqu’à 3 fois (parfois 5 pour les IT vitesse).

Amplitude :
C’est la différence entre l’intensité de l’exercice et de la récupération par rapport à l’intensité moyenne de l’exercice.

Saltin proposait ce calcul :

Pour un 30/30 à 120% de la VAM avec récupération passive (0% de la VAM) ; (120 + 0) / 2 = 60%. L'intensité moyenne est de 60%.
Pour l'amplitude (intensité max de l'exercice – l'intensité de la récupération) : moyenne d'intensité x 100 ; (120 – 0) : 60 x 100 = 200%. L'amplitude est ici de 200%.
Pour un 30/30 à 120% de la VAM avec récupération active (50% de la VAM) ; (120 + 50) / 2 = 85% ; (120 – 50) : 85 x 100 = 82.4%.
Pour les IT supra max, les amplitudes doivent être supérieures à 60%.
Pour le sub-maximale (sous votre VAM ou PAM mais assez proche), il faut du 20 – 30% entre l'effort et la "récupération".

Nombre de séries et répétitions :
L'IT peut multiplier par 6 le niveau maintenu en continu, c'est l'intérêt de ce dernier. Un optimal de travail de 2,5 à 4 fois le temps limite semble idéal.

Exemple :

Bien que très critiqué par des approches mathématiques lors de conférences, le travail de terrain reste très facile avec cette approche proposée par Véronique Billat. Nous l'utilisons parfois en adaptant le test.

Un sportif effectue un test VAMEVAL et obtient une VAM de 17 km/h.
3 jours plus tard est effectué un temps limite à VAM : il va falloir, après un échauffement de 20 min (possibilité de réduire à 10 min) à 60% de la VAM, courir à 100% de la VAM le plus longtemps possible.
L'augmentation de la vitesse se fait dans les dernières 20 secondes de l'échauffement.
L'idéal est de faire le test sur un tapis de course. Le temps limite passé à VAM est de 3 à 9 min en moyenne (certains auteurs trouvent 12 min).
Le sportif maintient sa vitesse 5 minutes.
Il a donc un Tlim de 5 min, que l'on notera "Tlim5".

L'objectif de l'IT étant de multiplier le temps passé à VAM, nous partons du principe que l'IT peut durer 4 fois (et même plus, en sachant que le minimum est 2,5 fois).

Tlim5 x 4 = 20 min

Nous choisissons le 30/30 à 120 % de la VAM avec récupération passive.
L'exercice doit donc durer 40 min pour obtenir 20 min d'effort.
Nous pouvons le faire par blocs, 2 blocs de 14 min et un de 12 min avec récupération de 3 min entre les blocs.

[14 x (30/30)] + r = 3 min + [14 x (30/30)] + r = 3 min + 12 x (30/30)

Il y a 7 + 7 + 6 = 20 minutes de course, le reste est de la récupération.

Bien entendu, dans un premier temps, nous préconisons la durée minimale de 2.5 le Tlim. Si le sportif lutte pour terminer sa distance, il faut retirer 5 ou 10 m mais continuer l'exercice.

Comment déterminer la distance ? Pourquoi 120 % pour de l'IT court ?

17 km/h X 120 % = 20,4 km/h. Sur une piste d'athlétisme, courir à 20,4 km/h offre la distance suivante en 30 secondes.

20 400 m ➞ 3600 secondes
X m ➞ 30 secondes

X = (20 400 x 30) : 3600
X = 170 m

Il faut donc parcourir 170 m en 30 secondes pour courir à 20,4 km/h (donc à 120 % de la VAM).

Le hasard mathématique entraîne cette pratique.
VAM à 120% x 10 = distance en mètre sur 30 secondes.

Sur le terrain, il est très pratique d'utiliser cette manière de faire.

Les exercices d'endurance, bénéfices en fonction des intensités

Partons des conseils de G. Millet dans son ouvrage sur l'endurance.

Figure 40 : Détermination des zones d'intensités en pourcentage du $\dot{V}O_2max$

On délimite dans un premier temps 3 ou 4 zones (intensités) importantes

40 à 60 %
80 à 90 %
100 %
170 %
< VO2 max
> VO2 max
SV1
SV2
VO2max
Modérés
<vVO2max
Sub-maximales
<vVO2max
Supra-maximales
>vVO2max
Maximales
=vVO2max

En dessous du seuil 1 :

Pour le débutant, cette intensité est adaptée pour la reprise. L'athlète peut en profiter pour créer des capillaires sanguins, soulager le muscle diaphragme des exercices de puissance en le travaillant sur l'amplitude.

Entre le seuil 1 et 2 :

Action préventive des blessures, augmentation progressive du volume pour renforcer l'appareil ostéo-musculo-tendineux.

- Augmentation du potentiel oxydatif par l'augmentation de la masse enzymatique mitochondriale, donc augmentation de la consommation des lipides et déplacement du *cross-over point* vers des intensités plus élevées (épargne du glycogène)…
- Augmentation de la densité de capillaires (nombre de capillaires par unité de surface ou par nombre de fibres) = meilleur transport de l'O_2 et des substrats (6 à 24 semaines d'entraînement en endurance augmentent de 20 à 29 % la capillarisation musculaire).
- Augmentation de la clairance du lactate plutôt qu'une diminution de sa production. (Participation plus importante des fibres oxydatives (MCT1)).

Entre le seuil 2 et $\dot{V}O_2$max :

- Efficace chez l'athlète.

Méthode IT : 15 secondes à 90 % et 15 secondes à 80 %.
Adapté pour la reprise (blessures).

À $\dot{V}O_2$max :

Le stress du myocarde est maximal à $\dot{V}O_2$max. La croyance encore enseignée est que le cœur débite une quantité de sang maximale à chaque battement jusqu'à 50 – 60 % de sa FCmax. La réalité est toute autre chez l'athlète. Pour une optimisation :

- contrôler la récupération (supérieur à 50 %) ;
- allonger la durée des temps limites (1,5 x Tlim) ;
- limiter les séances avec ratio 1 (1:1) chez les athlètes confirmés ;
- tendre rapidement vers des ratios 2 (1:1/2) (40/20 ; 30/15 ; 20/10...) ;
- tendre chez l'entraîné vers du ratio 3 (45/15 ; 30/10...).

Au-dessus de $\dot{V}O_2$max :

- Utiliser des pourcentages en fonction de la spécialité de l'entraîné (bien que le consensus actuel soit sur le 110 à 120 %).
- Cinétique de $\dot{V}O_2$ augmentée lorsque l'intensité augmente.
- Les athlètes ayant un Tlim long (>5minutes) auraient intérêt à utiliser des fractions d'effort plus longues lors des séances d'IT.
- Adaptations musculaires par l'IT (gain de force spécifique, rendement du cycle étirement/raccourcissement).
- L'IT améliore l'adaptation centrale (la puissance aérobie, la capacité anaérobie) et périphérique (augmentation de l'activité enzymatique oxydative et glycolytique).

Le travail en supramaximal anaérobie :

Intermittent max avec ratio 0,25, soit 1:4

- Augmenter la puissance anaérobie, améliorer la capacité anaérobie et améliorer le travail en "acidose"...
- L'aérobie est sollicitée lors des répétitions de sprints (effet non négligeable sur la puissance aérobie).

- 30 s de sprints répétés séparés de 4 minutes de récupération sollicitent dès le deuxième sprint l'aérobie pour la moitié de l'énergie.
- Les sprints courts (40 à 50 m) ne sollicitent pas le métabolisme aérobie.

Construction d'une programmation

Il existe tellement de tableaux descriptifs de la capacité ou de la puissance aérobie que le choix des méthodes ne devrait pas poser de problème pour l'éducateur sportif ou l'entraîneur. Bien qu'il existe des principes de base, il faut savoir évaluer et doser l'entraînement en fonction des sports pratiqués, du niveau du sportif, de sa progression...

Entraînement ou reprise d'un sédentaire

Pour la reprise d'activité d'un sédentaire, des exercices de capillarisation ou d'endurance fondamentale durant une période de 6 semaines sont un minimum avec une progression que seule l'observation directe de l'entraîné peut vous donner.

- *11% d'augmentation du volume d'entraînement d'une semaine sur l'autre afin d'éviter des progressions trop rapides.*
- 3 fois par semaine durant trois semaines et surtout éviter de dépasser 1h30 de cardio-training avec impacts.
- Les récupérations entre les séances doivent être complètes. L'endurance fondamentale n'étant pas très épuisante, une récupération de 12 h est donc suffisante.
- La capacité dans tous ses aspects de l'intensité la plus basse vers la plus "intense" peut ensuite prendre le relais (la puissance aérobie sera une suite logique si le besoin de développer cette qualité est souhaitable).
- Sinon, rester sur un mixte de capacité forte et alterner avec des exercices intermittents proches du 100 % du $\dot{V}O_2max$ reste très acceptable pour le maintien de l'endurance (minimum de deux fois par semaine).

Attention, faire un effort type temps limite à VAM ou de l'intermittent à VAM n'a pas le même effet sur la fatigue. Il est plus difficile de maintenir sa

VAM 6 minutes que d'entrecouper des exercices de 1 minute à 100 % avec une récupération de 1 minute durant des séries…

Entraînement ou reprise d'un sportif

Il était courant de dire que les exercices de capillarisation à intensité faible ne servaient à rien chez l'athlète entraîné. Aujourd'hui, il est possible de penser le contraire et de planifier deux semaines d'une endurance fondamentale afin de relâcher les tensions musculaires que les exercices de puissance peuvent engendrer (diaphragme…).
Par la suite, il faut bien comprendre les besoins du sportif vis-à-vis de l'endurance. Doit-il faire une compétition de demi-fond ou de fond ou ses besoins sont-ils pour un sport collectif, de combat… ?
Dans certains cas, des exercices intermittents proches du 100 % sont intéressants. La planification peut être complètement différente, entraînement biquotidien en endurance seule ou alliant endurance et endurance spécifique (liée à son sport de prédilection).

Recommandations de l'American College of Sport Medecine (ACSM)

Une distinction importante existe entre activité physique associée à la santé et celle associée à la performance physique.

Sport santé versus sport performance

Activité physique versus sport

Il est possible d'améliorer la condition des maladies métaboliques (diabète…) sans améliorer le $\dot{V}O_2max$ par des exercices peu intenses.

Quelle quantité appropriée d'activité physique est nécessaire pour obtenir des bénéfices sur la santé et sur diverses maladies chroniques ?
- Maladie coronarienne.
- Hypertension.
- Ostéoporose.
- Obésité.
- Contrôle du poids…

Un effet dose-réponse à l'exercice est observé pour des quantités variées d'activité physique s'échelonnant approximativement de :

- 700 à 2000 kilocalories d'effort par semaine.
- 15-20 semaines semblent également une bonne dose avant d'obtenir de véritables bénéfices. Nous pouvons espérer 10 à 30 % d'amélioration avec l'entraînement.
- 10 – 15 % d'amélioration sont souvent rencontrés.

Afin de viser une santé minimale, les recommandations sont les suivantes :

40 - 49 % du $\dot{V}O_2$max ou de la FC réserve

Tableau 12

Zone	Idéal pour	Bénéfice escompté	Intensité
1 • Léger	Exercice léger	Maintien cardiaque	50 – 60 %
2 • Brûleur	Maigrir	Consommation des lipides	60 – 70 %
3 • Base	Endurance de base	Augmentation de l'endurance aérobie	70 – 80 %
4 • Amélioration	Condition physique	Maintien d'une condition physique excellente	80 – 90 %
5 • Athlète	Entraînement intense	Maintien d'une condition physique maximale	90 – 100 %

Ce tableau tente de nous démontrer les intensités et les bénéfices possibles, mais ceci reste bien léger dans l'approche.
Dans les grandes lignes :
Cible pour un maintien cardiaque
= 40 à 60 % de $\dot{V}O_2$max
Cible condition physique
= 60 à 85 % de $\dot{V}O_2$max
Cible de l'entraînement élite
= > 85 % $\dot{V}O_2$max

Ce qui reste vrai, c'est la progression de l'entraînement par étapes comme le tableau suivant.

Pour Monsieur et Madame tout le monde, afin d'être en bonne santé, il faut d'après l'ACSM.

Tableau 13

Fréquence	3 – 5 jours / semaine
Intensité	40 – 85 % de HRR ou $\dot{V}O_2R$ (FC réserve ou $\dot{V}O_2$ réserve)
Temps	20 – 60 minutes / jour
Type	Exercice aérobie

Ci-après, une logique de progression pour débutant en cardio-training adaptée de l'ACSM.

Tableau 14

Niveau	Semaine	Fréquence (par semaine)	Intensité (% $\dot{V}O_2$max ou FC de réserve)	Durée (minutes)
Débutant	1	3	40-50	15-20
	2	3-4	40-50	20-25
	3	3-4	50-60	20-25
	4	3-4	50-60	25-30
Intermédiaire	5-7	3-4	60-70	25-30
	8-10	3-4	60-70	30-35
	11-13	3-4	65-75	30-35
	14-16	3-5	65-75	30-35
	17-20	3-5	70-85	35-40
	21-24	3-5	70-85	35-40
Confirmé	> 24	3-5	70-85	20-60

À noter que le pourcentage de $\dot{V}O_2$max est quasiment identique au % de FC de réserve bien que des différences existent entre le vélo et la course à pied. Mais l'utilisation de la FC reste inintéressante si nous ne connaissons pas le $\dot{V}O_2$max pour un travail d'une intensité inférieure à 95 % du $\dot{V}O_2$max.

Une réactualisation sur l'utilisation de la FC :

Le mythe du calcul de la fréquence cardiaque maximale ; 50 formules répertoriées dont la plus connue n'est pas publiée scientifiquement…

Le cœur est un organe endocrine (qui sécrète des hormones) et aussi une pompe à faire circuler le sang. Savez-vous qu'il a fallu presque 150 ans pour que la science admette cette réalité ? Avant, nous pensions que le sang était un liquide qui stagnait.

La fréquence cardiaque de repos est à surveiller et son augmentation constante au fil des années nécessite un dialogue avec son médecin. L'INSERM recommande de la prendre régulièrement. La baisse de la FC de repos suite à la reprise de l'activité physique est souvent associée à l'amélioration de la condition physique. À l'exercice, il est préconisé de travailler à une intensité donnée pour obtenir des bénéfices au niveau santé cardiaque ; cette intensité nécessite la prise en compte de la FC de repos.

Qu'en est-il du calcul de la fréquence cardiaque maximale (FC max) ?
C'est votre compte-tours personnel avec une zone rouge dans les valeurs les plus élevées. Elle a tendance à évoluer à la baisse avec l'âge… la zone rouge arrive de plus en plus tôt.

Comment la trouver ?
La formule la plus répandue est [220 – votre âge] ou formule de Haskell et Fox (1970), improprement appelée formule d'Astrand (erreur reproduite dans de nombreux ouvrages depuis des dizaines d'années alors que ces docteurs ès sciences se sont déjà exprimés sur le sujet dans le *New York Times* en 2001).
Imaginons que vous ayez 60 ans. Votre FC max sera égale à 220 – 60, soit une FC max de 160. Cela veut dire que votre FC max est théoriquement de 160 BPM (BPM = battements par minute). Attention aux croyances qui préconisent une formule différente pour les hommes et les femmes sédentaires ou actifs.

Pourquoi cette valeur semble importante ?

Les magazines vous expliquent comment ajuster l'intensité de votre exercice en fonction d'un pourcentage de votre FC max. La même chose est proposée dans les salles sur les machines de cardio-training (vélo, tapis, rameur, etc.) ou mémorisée dans des montres de différentes marques mesurant la FC en continu.

Si vous faites de l'hypertension artérielle, il est conseillé de travailler à 50 % de la FC. Pour la personne de 60 ans dont la FC max est de 160 BPM, cela donne : 160 X 50 % = 80 BPM. Comprenez que cette valeur est nettement trop faible pour avoir un quelconque effet sur votre santé cardiaque puisqu'elle correspond grosso modo (et pour rendre hommage à l'entraîneur d'athlétisme Sébastien Peix, nous dirions *grosso merdo*) à la FC que vous avez en étant debout sans bouger puisque que la FC au repos peut aller de 50 à 90 BPM. Pourtant, c'est ce qu'on lit régulièrement.

Comment alors obtenir la bonne valeur ?

Il faudrait utiliser une autre formule nettement plus récente et précise car basée sur une étude réalisée avec un grand nombre de personnes et sur une période de suivi sur 20 ans. C'est actuellement la formule la plus fiable… ou la moins fausse (Gellish et coll. 2007) :

$$\text{FC max} = 207 - 0{,}7 \times \text{âge}$$

Précision pour ceux qui voudraient faire un tableur, initialement, la formule est 206,9 - 0,67 x âge (avec ± 5-8 bpm) ; et même mieux, entre 35 et 75 ans, il faudrait utiliser 191,5 - 0,007 x âge² (± 0-2 bpm) (toujours des mêmes auteurs).
De plus, si vous voulez comparer ces formules avec le 220 – âge, la valeur calculée à 40 ans donne les mêmes résultats ; hasard mathématique qui peut engendrer de mauvaises conclusions vis-à-vis de l'utilité de la formule.

À propos de l'étude :

Gellish et coll. (2007) ont fait un suivi longitudinal (mêmes sujets testés pendant des années) entre 1978 et 2003 dans l'institut médical de l'université d'Okland (Michigan).
Sur les 4666 personnes qui sont venues durant cette période et qui ont fait plus de 7000 tests maximaux (test sur tapis de Balke), seuls 100 hommes et 32 femmes ont été retenus pour avoir fait plus de 6 tests maximaux. Cet échantillon représente au total 908 tests administrés sur 25 ans. Et 90% sont de type caucasien.
Après filtrage des données, 697 tests ont été retenus chez les hommes et 211 chez les femmes. Ils ont été réalisés sur une période de 9 ans ± 3,7 ans après l'élimination du premier test dit d'accoutumance.
C'est la première étude du genre ! Et donc, à l'heure actuelle, la plus fiable comme en témoignent d'autres études publiées ultérieurement (Cleary et al. 2009).
➞ Les contraintes : une validité restreinte à une population entre 30 et 75 ans, et une erreur type de 0 à 5 battements selon l'âge, le sujet, le genre.
À propos de la formule FC max théorique = 206,9 – (0,67 x âge) :
La seconde formule qu'ils ont réussi à ajuster aux données est de forme curvilinéaire (comme le montrent la plupart des études) :
FC max théorique = 191,5 – 0,007 x âge x âge
(ou FC max théorique = 191,5 – 0,007 x âge^2)
Mais ils ont préféré conseiller la formule linéaire pour la simplicité d'utilisation :
FCmaxT = 206,9 - 0,67 x âge

Toujours pour un âge de 60 ans, cela donne une FC max de 165 BPM. Même si l'écart ne semble pas si énorme, l'utilisation d'une formule statistique pour faire une estimation d'ordre individuel introduit forcément une ***erreur***. Là où elle est de ± 11 BPM pour la formule de Haskell et Fox, elle n'est plus que de ± 3 à 5 BPM pour celle de Gellish et coll. Il convient donc de la limiter le plus possible par l'utilisation de la formule la plus récente. Maintenant, si vous voulez individualiser votre entraînement au mieux, à

chaque fois que vous voudrez appliquer un pourcentage de travail lu ou conseillé par un professionnel, utilisez cette manière de procéder. C'est un peu technique, mais c'est plus fiable que tout ce qui est généralement proposé.

Vous avez 60 ans, votre FC max par calcul est de 165 BPM. Vous devrez mesurer votre FC de repos.

Allongez-vous 2 minutes dans un endroit calme, comptez le nombre de battements en 1 minute en prenant votre pouls au poignet ou à la gorge. Vous trouvez par exemple 75 BPM. La FC de repos prise le matin au réveil reflète mal votre FC de repos de la journée et n'est pas forcément la valeur que nous devons rechercher.

Comment utiliser cette valeur pour doser son entraînement ?
La bonne fréquence cardiaque pour votre entraînement sera obtenue avec la formule suivante (Karvonen et coll., 1956) :

FC d'entraînement = 50 % x (FC max –FC de repos) + FC de repos

Cette formule très bien pensée explique que votre FC de repos correspond à votre 0% d'intensité et vous aide à déterminer toutes les étapes jusqu'à votre 100% donc, votre FC max.

Cela donne pour vous :

- FC d'entraînement = 50 % x (165 BPM – 75 BPM) + 75 BPM
- FC d'entraînement = 50 % x 90 BPM + 75 BPM
- FC d'entraînement = 45 BPM + 75 BPM
- FC d'entraînement = 120 BPM à laquelle on ajoute une petite marge de 3 BPM (donc une fourchette comprise entre 117 et 123 BPM)... on est loin des 80 BPM que nous avions trouvés plus haut.

En résumé, vous allez **mesurer** votre FC de repos mais **calculer** votre FC

max avec la bonne estimation ; la seule **variable restante** sera **l'intensité** de l'effort à calculer avec la formule de Karvonen.
Ne dépassez pas 80 % au niveau intensité lors de la reprise d'une activité physique, et **allez voir votre médecin** avant tout début d'entraînement.
Un test d'effort est le seul moyen de connaître votre véritable fréquence cardiaque maximale (avec des valeurs parfois éloignées du théorique) si le médecin vous amène jusqu'au bout de vos possibilités physiques.

À conserver :

• Formule proposée par Gellish 2007 :
Si âge entre 30 et 75 ans :
Fréquence Cardiaque Maximale Théorique (ou FCMT) = 191.5 – 0.007 x $âge^2$
Si moins de 30 ans ou plus de 75 ans :
Fréquence Cardiaque Maximale Théorique (ou FCMT) = 206,9 – 0,67 x âge
• Formule de Karvonen (1956) :
FC cible = %(FC max - FC repos) + Fc repos

Pour ceux qui aimeraient faire correspondre des % de FC max avec un % de $\dot{V}O_2max$ sans connaître la FC de repos, voici une formule assez pratique.

Équation de Swain et al. :
% HR max = 0.64 x % $\dot{V}O_2max$ + 37
Cette formule est utile si l'on ne connaît pas la FC de repos, elle remplace la notion de fréquence cardiaque de réserve approximativement.

Outils à utiliser si la notion de FC n'est pas acquise

Partant de l´hypothèse selon laquelle la pénibilité d´un exercice est proportionnelle à la FC et à la lactatémie, Borg a mis au point une échelle de correspondance de 6 à 20. Il suffit de multiplier par 10 l´indice donné par l´échelle et désigné par le sportif en fonction de la pénibilité ressentie en effectuant l´exercice, pour retrouver sa valeur de FC.

Tableau 15 : Échelle de Borg et correspondance avec le $\dot{V}O_2max$

Rate of Perception of Exhaustion (RPE) de Borg (1970) ou échelle de perception de l'effort (EPE)		Correlation avec le $\dot{V}O_2max$
6	aucun effort	
7 et 8	effort extrêmement léger	
9 et 10	effort très léger	20
11 et 12	effort léger	39
13 et 14	effort un peu dur	
15 et 16	effort dur	80
17 et 18	effort très dur	85
19	effort extrêmement dur	95
20	épuisement maximal	100

Des études effectuées avec de la course ou de la marche sur tapis roulant ou sur un ergocycle suggèrent que les personnes préfèrent l'exercice à une intensité approximative de 60-65 % du $\dot{V}O_2max$ de manière intuitive, alors que les coureurs de distance entraînés préfèrent une intensité de 75 % de la $\dot{V}O_2max$. L'EPE à ces intensités est typiquement d'approximativement 12-14.

L'amélioration du $\dot{V}O_2max$ augmente avec la fréquence d'entraînement, mais la valeur du changement est plus petite et a tendance à plafonner quand la fréquence d'entraînement est augmentée au-dessus de 3 j/sem. S'entraîner moins de 2 j/sem n'amène généralement pas d'augmentation significative du $\dot{V}O_2max$.

Une petite remarque pour les débutants assez frêles, les femmes et les seniors.

Les joggers débutants ont une augmentation de blessures aux pieds, aux jambes et aux genoux quand l'entraînement est :

> 3 jours/semaine

et

> 30 minutes par séance d'exercice !

Le manque de musculature des membres inférieurs et un bassin assez large (chez les femmes) entraînent un angle du fémur loin d'être optimal à l'encaissement des contraintes de l'impact en course à pied. Cette notion

est nommée le Q-angle.
Nous conseillons de ne pas faire plus d'1h30 d'impacts cumulés par semaine ni de séance supérieure à 30 min (toujours d'impact). Ceci au moins durant 4 semaines. ***La musculation est un excellent complément au cardio-training chez le débutant et aide à éviter les blessures (rôle prophylactique de la musculation pour l'endurance). N'hésitez pas à utiliser le vélo.***

Une aide à la recherche sur le marathon ou les plus longues distances

Nous ne cherchons pas une aide intégrale à la longue distance, seulement des pistes qui nous servent encore ; des ouvrages plus spécialisés peuvent aider le lecteur qui veut aller plus loin.

Historique

En 490 avant J.-C. à Marathon :
Miltiade (stratège de l'armée) conduit les Athéniens (avec l'aide des Platéens) à la victoire contre les Perses.
- Fin de la guerre médique.
- Prestige des Grecs.
- Le soldat Philippidès accomplit la distance Marathon-Athènes pour apporter la nouvelle.
- Le soldat Philippidès meurt d'épuisement (ce qui est en fait une légende urbaine)...

Philippidès (phidippidès) est également l'initiateur du Spartathlon (ultra-marathon) qui relie Athènes à Sparte. Il commémore la course qu'il fit avant celle de Marathon pour demander de l'aide aux Spartiates.

Selon la légende :
250 km en 36 heures ➞ 6,9 km/h
La distance au marathon est devenue celle que nous connaissons car lors des Jeux de 1896, Pierre de Coubertin (président du CIO) voulait un chiffre rond : 40 km. En 1908, aux J.O. de Londres, le roi Edouard VII demande que

Années	Temps marathon
1896	2h 58' 50"
1908	2h 55' 18"
1920	2h 32' 35"
1935	2h 26' 46"
1947	2h 25' 39"
1952	2h 20' 43"
1953	2h 18' 35"
1954	2h 17' 40"
1960	2h 15' 17"
1963	2h 14' 28"
1964	2h 12' 12"
1965	2h 12' 00"
1969	2h 08' 34"
1981	2h 08' 18"
1984	2h 08' 05"
1985	2h 07' 12"
1988	2h 06' 50"
1998	2h 06' 05"
1999	2h 05' 42"
2002	2h 05' 38"
2007	2h 04' 26"
2008	2h 03' 59"

le marathon commence de son château de Windsor (la famille royale voulant voir le départ). Les derniers 100 mètres du stade olympique de White city étant l'arrivée, la nouvelle distance réglementaire est fixée à 42 km 195 m.

Avant de courir 42 km, il faut commencer doucement ; une méthode pour passer de 0 à 5000 m en 10 semaines.

Analysons ensemble une logique de progression pour débutant en cardio-training offerte par Grete Waitz (championne Olympique de Marathon) adaptée de "Lore of running" de Tim Noakes.
L'idée est de proposer sur un temps de séance de 45 à 60 min (incluant l'échauffement de 10 min) une progression. Chaque séance consacre un temps aussi court soit-il au renforcement musculaire et aux étirements. L'endurance provoque ce sentiment désagréable au début d'un effort que l'on regrette d'avoir entamé car culturellement, il nous donne l'impression que s'arrêter est une erreur. Il est facile de se décourager. Waitz a compris ce sentiment et a proposé dès le début une progression sans séance en continu.

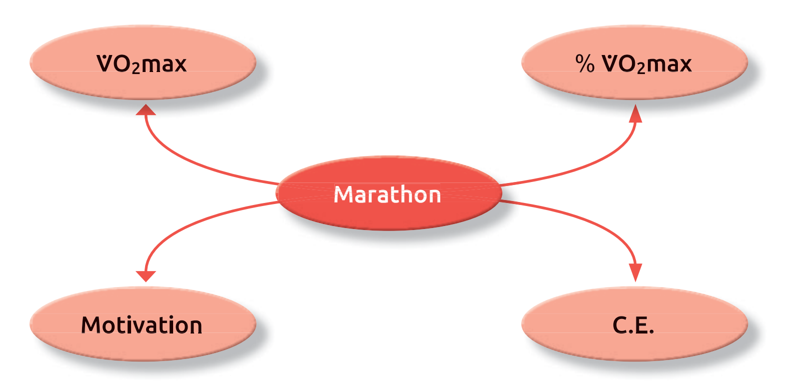
En rapide :

- Durant les 4 premières semaines, faire attention aux "alertes" (fatigues, stress...).
- 45 à 60 minutes avec échauffement et retour au calme.
- Inclure "musculation" (Renforcement Musculaire Général) et stretching.
- Faire aimer la course, faire passer des émotions, ne pas se décourager...
- 2 ans avant de faire un marathon...

Tableau 16 : Exemple de progression

SEMAINE	PROGRAMME
1	• Alterner course et marche sur 100 m sur 1,6 km (3/semaine)
2	• Alterner course et marche sur 200 m sur 2 km (3/semaine)
3	• Alterner course et marche sur 200 m à 400 m sur 2,5 km
4	• Alterner course et marche sur 400 m à 800 m sur 3 km
5	• Alterner course 800 m et marche 400 m sur 3,2 km • Alterner course 1,2 km et marche 800 m sur 3,2 km • Course 3,2 km
6	• Course 800 m, marche 400 m, course 1,2 km, marche 400 m et course 800 m = 3,6 km • 1,6 km course, 400 m marche et 800 m course = 3,6 km • 3 à 3,6 km course
7	• 3,8 km 3/semaine
8	• 4,4 km 3/semaine
9	• 4,8 km 3/semaine
10	• 5 km 3/semaine

Qualités d'un marathonien



Les facteurs d'influence du marathon

Le marathonien ne doit seulement avoir un bon $\dot{V}O_2$max (puissance maximale aérobie), mais il doit être capable de tenir un grand pourcentage de celui-ci (endurance aérobie), avoir une bonne technique de course (la musculation aide à gagner en économie de course) et une bonne motivation.

Musculation et marathon ! Pourquoi en faire ? Pour améliorer son CE :

Durant une course, chaque pied reçoit 70 tonnes de pression par kilomètre :

70 000 kg / 500 appuis = 140 kg/appui
= 2 G pour la course ; 5 G pour le sprint

Course	→	Impacts au total (moyenne)
1 500 m	→	750
10 000 m	→	6 à 8 000
42 195 m	→	21 000

Ce tableau démontre que le marathon est une contrainte importante pour le système musculaire, une préparation de ce dernier est indispensable. *Une chaussure de sport perd 30 à 50% de sa capacité d'absorption après 400 km de course.*

La force est aujourd'hui au programme du marathonien car :

- Plus la force est grande, plus le nombre de fibres recrutées est grand.
- L'augmentation de la force apporte, à des intensités submaximales (et des niveaux identiques de puissance mécanique fournie), une diminution de la tension (Hickson 1988).
- Lors de fatigue excessive ou d'entraînements exclusivement en endurance, on observe une dégradation des qualités musculaires.
- La raideur neuromusculaire (capacité à restituer l'énergie) diminue.

(Komi 2000 ; Millet 2002 ; Nico 1991)

Marcinik et al. (1991) : 12 semaines, un entraînement de force trois fois par semaine à des cyclistes (15 – 20 répétitions, extension genou, flexion hanche et squat parallèle avec 30'' de récupération).

Conclusion :

- aucune modification de $\dot{V}O_2max$;
- une augmentation du temps limite à 75 % de $\dot{V}O_2max$, de 33 % ;
- l´entraînement en force augmente les performances d´endurance indépendamment des changements de $\dot{V}O_2max$.

Après un travail de musculation :
- diminution de la lactatémie ;
- augmentation du temps limite à VAM ;
- pas de perte de fibre I ;
- pas d'hypertrophie (la quantité d'endurance est trop importante) => pas de dilution mitochondriale.

Paavolainen (1991 et 1999) :
- diminution des temps de contacts au sol ;
- amélioration de l'économie de course ;
- amélioration de la performance.

La musculation sous forme de contraste de charge est la plus efficace (cf. Chapitre 6) !
Ne pas sous-estimer l'intensité du marathon :

Distance	→	% de $\dot{V}O_2max$
5000	→	94 % (89 à 100 %)
Marathon	→	82 % (76 à 87 %)
85 km	→	67 % (53 à 76 %)
24 h de course	→	45 %

Il est impressionnant de noter que le marathon peut se faire à 87% de son $\dot{V}O_2max$, cela demande une grande économie de course et une très grande endurance aérobie.

Des formules pour le terrain...

Avec la VAM, trouver son $\dot{V}O_2max$...
VAM (km/h) = ($\dot{V}O_2max$ + 7,736) : 3,966
Plus simple : VAM (km/h) = $\dot{V}O_2max$: 3,5
Équation de prédiction (Noakes, Myburgh 1990) :
Après un 10000 m : temps marathon = 5,48 x (temps au 10 km en min) - 28
Après un semi-marathon : temps marathon = 2,11 X (temps au 21 km en min)

Aux frontières de l'entraînement en endurance

Le contexte

Ces dernières années sont apparues des données pour le moins étranges. Elles remettent en question pas mal des concepts exposés tout au long de ces deux parties consacrées à l'endurance.

Sans pour autant tout remettre en question, il nous semble opportun, dans un ouvrage consacré aux fondamentaux de la préparation physique, de présenter les données les plus insolites, celles qui nous questionnent le plus, celles qui nous obligent encore et toujours à repenser notre vision des choses : à savoir celle du **métabolisme énergétique considéré comme un tout et non un ensemble de compartiments qui seraient séparés par des seuils délimitant des "filières" énergétiques indépendantes.**

González-Haro et coll. (22, 23) dénombrent pas moins de 9 modèles explicatifs pour cette notion de "seuil anaérobie". Et dans une revue récente sur le sujet, Faude et ses collaborateurs (15) ont rapporté l'existence de 25 façons de calculer le seuil anaérobie.

On nous montre de belles images comme celle, ci-dessous (figure 41), photographiée dans un laboratoire de médecine du sport à l'étranger. On y voit une augmentation progressive de la concentration de lactates (mmol/l) en fonction de l'intensité (watt) et une valeur *arbitrairement* choisie comme "seuil" au-delà duquel on considère que l'augmentation de lactates est effective (rectangle).

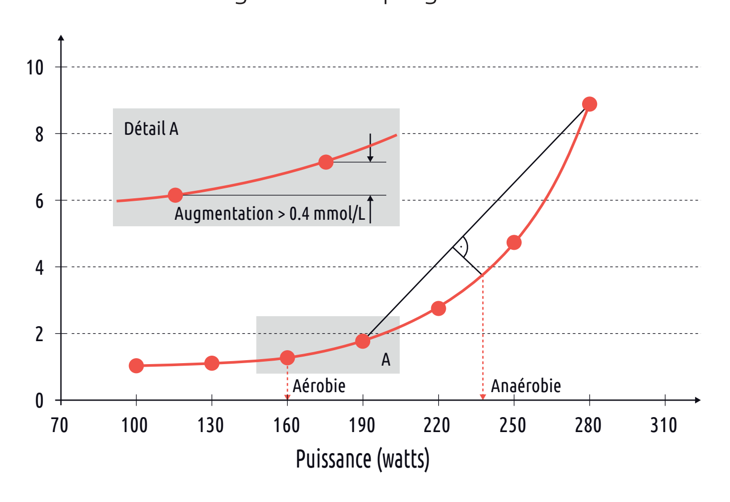


Figure 41 : Exemple de relation production de lactate/intensité.

Pourtant, cette augmentation n'est pas si marquée que ça, il n'y a pas de vrai décrochage.
Autre exemple de l'utilisation de cette notion de "seuil" dans les méthodes d'entraînement. Il est d'usage de compartimenter les filières en fonction des effets que l'on est "supposé" obtenir en termes d'adaptation du muscle à cette forme d'entraînement et qui vise à améliorer les capacités dans tel ou tel secteur, généralement capacité, puissance, vitesse en ce qui concerne l'endurance.

On nous propose donc des zones d'entraînement comme celles résumées dans la figure issue de l'article de Faude et coll. (15). Le développement de tel ou tel aspect du muscle serait lié à ces zones comme par exemple l'augmentation de l'endurance (capacité), de la capillarité musculaire et la création de mitochondries pour les intensités faibles à modérées et l'augmentation de la VAM (puissance), du stock de glycogène pour les intensités intenses à maximales.

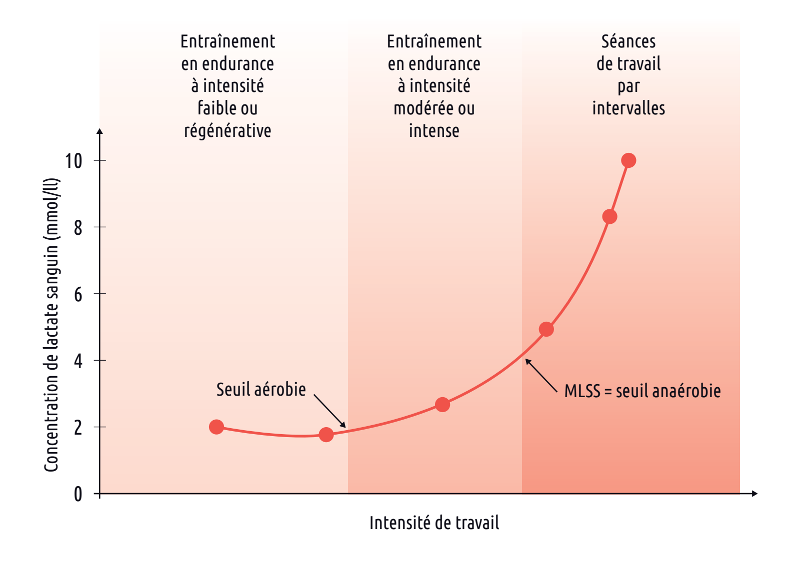


Figure 42 : Zones d'entraînement en fonction des seuils aérobie et anaérobie. D'après Faude et coll. (15).

Pour justifier ces choix, on utilise des données comme celle tirée d'une autre illustration issue de l'article sus-cité (15) qui présente la variation de concentration de lactate sanguin à intensité de travail constante (entre 20 et 40 min selon l'intensité). On voit qu'à partir d'une certaine intensité exprimée en % du V̇O2max la production de lactate n'est plus stabilisée dans le temps.

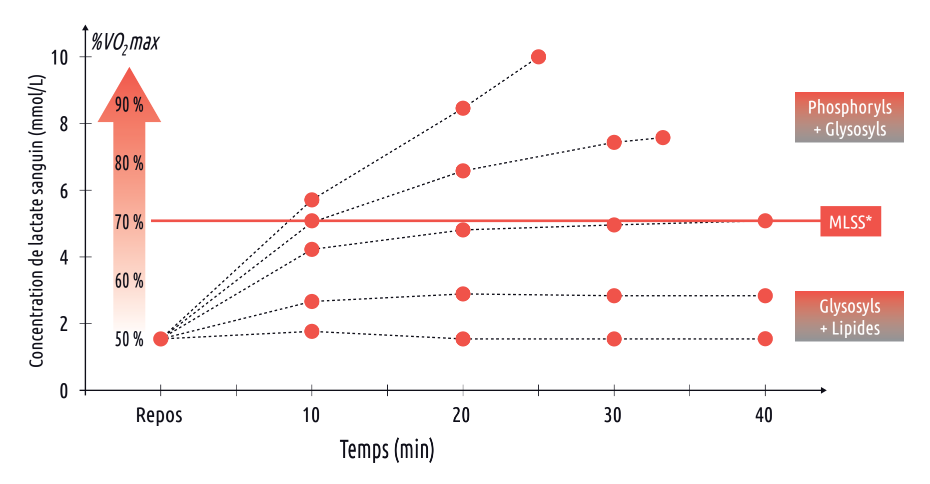


Figure 43 : Détermination de l'intensité au-delà de laquelle la production maximale de lactate n'est plus stable durant l'exercice.

À notre connaissance (et celle d'autres auteurs), il n'existe pas de méthode pour prédire quel sera le niveau de lactate sanguin à MLSS. Le lactate sanguin à MLSS est d'une très grande variabilité d'un individu à l'autre. Inversement, il est impossible de dire à partir d'une concentration de lactate sanguin donnée pour une intensité constante si le sujet est au-dessus, à, ou au-dessous du MLSS.

D'ailleurs, concernant le "seuil anaérobie", on oublie trois faits scientifiques moult fois démontrés :

1 • La production de lactate se fait en continu dans nos muscles dès les

puissances LES PLUS FAIBLES et augmente de façon quasi LINÉAIRE à mesure que la puissance augmente, tout comme le fait le $\dot{V}O_2max$.
2 • L'hypoxie n'est pas une condition nécessaire pour que le muscle produise du lactate.
3 • Le muscle travaille sans être en hypoxie jusqu'aux valeurs maximales du $\dot{V}O_2max$.

En revanche, il est tout à fait possible de noter des modifications de la courbe de production des lactates en fonction de l'intensité avec l'entraînement ou le désentraînement (encart 1, p. 92). Il est tout aussi possible de suivre l'évolution de MLSS et de constater les effets de l'entraînement. Cela est aussi un fait issu des données expérimentales qui reflète le processus de production et d'élimination au repos et à l'exercice : la mesure faite est le résultat NET (production – élimination).

En résumé, on fait dire à des mesures physiologiques des choses qui ne reflètent pas forcément la réalité physiologique des phénomènes qui se déroulent dans le muscle. Cette notion de "seuil anaérobie" est battue en brèche depuis ces 30 dernières années même si elle continue à être utilisée sur le terrain ou dans les laboratoires (22, 23, 40). Ce qui est démontré au niveau du métabolisme, c'est plutôt un continuum énergétique. Le muscle est un moteur hybride qui choisit en permanence le carburant qui convient le mieux à ses besoins et faire face aux contraintes imposées par l'exercice. Il réagit de façon globale et non analytique.

Pour nous, ces notions sont trop réductrices et nous empêchent de voir au-delà de ce que nous montrent les ouvrages, de découvrir de nouvelles frontières du métabolisme qui vont, non pas compartimenter, mais englober les différents phénomènes observés dans une vision plus complète du métabolisme musculaire.

Voilà le contexte. Nous avons une méthode, un effet. C'est rassurant et cela justifie déjà en soi les heures de préparation consacrées à établir une programmation tant il y a de variables à gérer.

Et si maintenant nous vous disions qu'il faut repenser les méthodes d'entraînement trop compartimentées car elles s'appuient sur des données erronées ?

Vous seriez soit très critique, soit curieux, soit les deux. Mais nous espérons que cette idée ne vous laisserait pas indifférent. Car tel est le résultat de ce que plusieurs publications ont livré. Certains protocoles sont passés inaperçus, certains résultats réfutés par leurs propres auteurs car cela remettait trop de choses en cause. Ils avançaient une erreur de mesure pour expliquer les données qui n'étaient pas en conformité avec le dogme prévalant à cette époque. C'est là que d'autres auteurs ont testé la validité de ce dogme.

Ce dogme est que, en dessous de $\dot{V}O_2$max on est dans la filière aérobie et qu'au-delà on est dans la filière anaérobie. En gros, il faut rester sous ce paramètre pour améliorer les processus liés à l'aérobie. Point de salut pour ceux qui iraient au-delà pour améliorer leurs valeurs aérobie selon le sacro-saint principe de spécificité de l'entraînement.

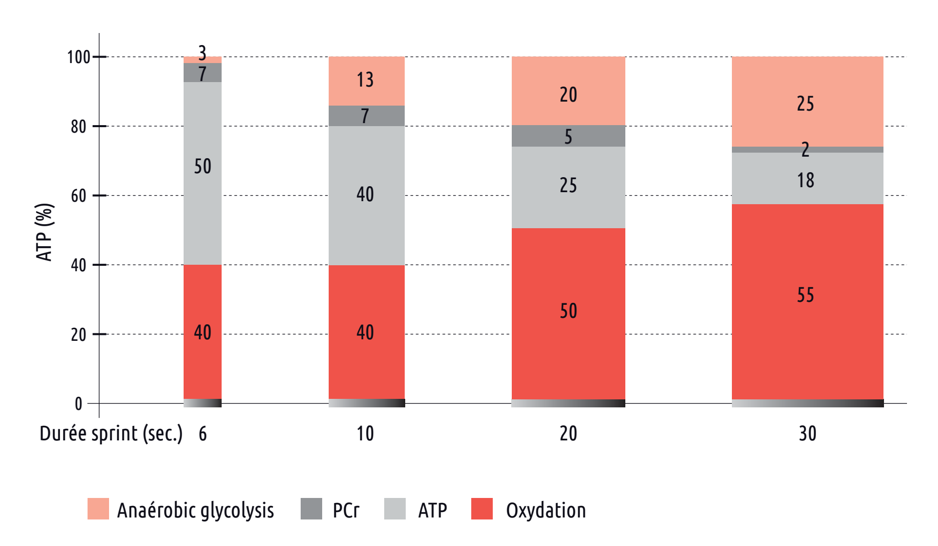


Figure 44 : Inter-métabolisme démontré pour des durées d'exercices très courtes. D'après Billaut et Bishop (2). Les processus énergétiques aérobie et anaérobie sont utilisés conjointement à toute intensité d'exercice.

Les parties précédentes vous ont présenté les données permettant aujourd'hui de parler non pas de filière mais de métabolisme ou d'inter-métabolisme énergétique. Les deux grandes voies métaboliques sont en interaction perpétuelle. Elles ne marchent pas l'une sans l'autre.
Des figures issues de travaux comme celui de Billaut et Bishop (2) démontrent parfaitement que ce que l'on considère comme les filières anaérobie alactique, anaérobie lactique et aérobie sont en fait un ensemble de mécanismes de production d'ATP qui interagissent en permanence pour répondre aux besoins en énergie des fibres musculaires à quelqu'intensité que ce soit, et ce y compris pour des intensités aussi brèves que celles utilisées dans un 100 m (figure 44).

C'est là que tout commence...

HIT

Explorons les effets de l'entraînement à haute intensité ou High Intensity Training (HIT). En 1998, Franch et coll. (16) ont comparé 3 formes d'exercice :

- Continu à l'épuisement (DT) : 15 km/h pendant 26 min ;
- HIT Long (HIT-L) : 4-6 x 4 min à 16,6 km/h avec 2 min de récupération passive ;
- HIT Court (HIT-C) : 30-40 x 15 s à 20,4 km/h avec 15 s de récupération passive.

L'entraînement se faisait 3 fois par semaine pendant 6 semaines, soit 2,2 h/sem. L'intensité moyenne que les sujets ont tenue sur 6 semaines était de 65 % de FCmax.

	DT	HIT-L	HIT-C
$\dot{V}O_2max$	5.9 %***	6.0 % ***	3.6 % **
$v\dot{V}O_2max$	9 %***	10 %***	4 %*
Temps à l'épuisement à 87 % de $\dot{V}O_2max$	94%***	67 %***	65 %**
Économie sous maximale de course	3.1 % **	3.0 % *	0.9 % (NS)

NS : non significatif ; * : p < P,05 ; ** : p < 0,01 ; *** : p < 0,001

Plus récemment, pendant 8 semaines à raison de 3 entraînements par semaine, Helgerud et coll. (31) ont testé les effets de 4 formes de travail classiquement utilisées sur le terrain en faisant en sorte d'avoir une équivalence de durée des séances :

- le travail long à faible intensité (LSD, long Slow Distance) : 1 x 45 min à 70 % du V̇O2max ;
- le travail au seuil anaérobie (Lactate threshold, LT) : 1 x 24 min 25 s à 85 % de V̇O2max ;
- le travail intermittent sous-maximal court avec récupération passive (15/15) : 47 x [15 s – 15 s] à 90-95 % de V̇O2max ;
- le travail intermittent sous-maximal long avec récupération active (4/4) : 4 x [4' à 90-95 % – 4' à 70%].

Le résultat est que seul le travail intermittent améliore le V̇O2max et le volume d'éjection systolique (VES) comme illustré par la figure 45.

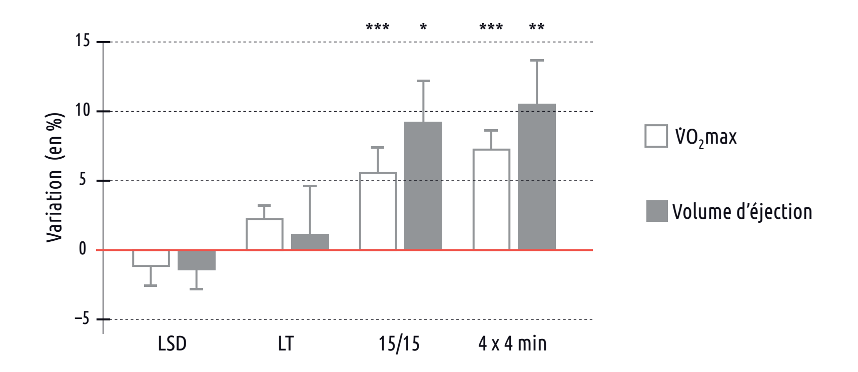


Figure 45 : Effets de 4 formes d'entraînement sur le V̇O2max et le VES. D'après Helgerud et coll. (31).

Encore plus récemment, une relation dose-effet a été clairement mise en évidence entre l'intensité de l'exercice et l'augmentation du V̇O2max (24), illustrée par la Figure 46. Plus on est proche de V̇O2max et plus l'effet est important. Cela semble logique si l'on interprète du point de vue du principe de spécificité de l'entraînement évoqué plus haut.

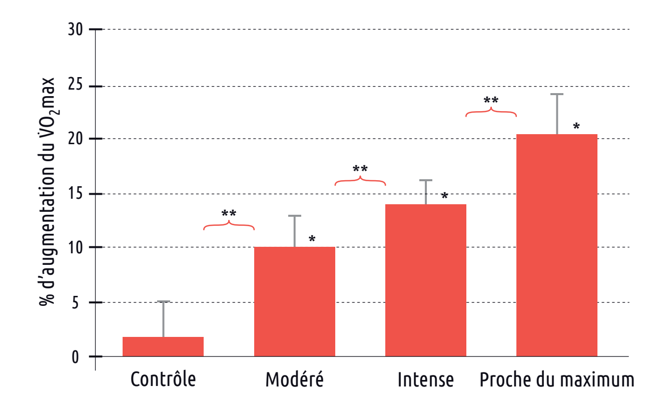


Figure 46 : Relation dose-effet entre intensité et V̇O2max. D'après Gormley et coll. (24).

SIT et HIIT

Poussons la logique plus loin : et si l'on s'entraînait au-delà de V̇O2max pour vérifier cette relation dose-effet ? C'est ce qu'ont fait certains (26, 39, 50, 51). Nous donnerons la signification des deux acronymes du titre de cette partie en cours de chemin...

Le modèle Tabata

Les premiers à avoir pensé qu'il y avait quelque chose de bizarre sont Tabata et son équipe (51). Le travail s'est fait en 2 phases.

La première : vérification de l'effet d'un entraînement à intensité modérée (70 % du V̇O2max) d'une durée d'une heure, tous les 2-3 jours pendant 6 semaines. La capacité anaérobie n'a pas changé alors que le V̇O2max a augmenté de 9 %. Jusque-là rien de surprenant.

Dans une seconde phase, le test a porté sur l'entraînement intermittent à intensité supra-maximale. L'entraînement s'est fait 5 fois par semaine pendant 6 semaines avec des séances à l'épuisement comptant 7 à 8 répétitions de sprint de 20 s sur un ergocycle à 170 % de V̇O2max suivies de 10 s de récupération passive. Là encore, le V̇O2max a augmenté (13 %) alors

que la capacité anaérobie augmentait de son côté de 28 %. Conclusion, l'entraînement sous-maximal améliore les paramètres physiologiques aérobie et **l'entraînement supra-maximal les paramètres à la fois aérobie et anaérobie**. L'entraînement intermittent à haut intensité (High Intensity Interval-Training, HIIT) est doublement intéressant.

C'est là que le bât blesse. Comment un exercice supra-maximale peut-il améliorer à la fois les processus énergétiques aérobie ($\dot{V}O_2$max et infra) et anaérobie (supérieur au $\dot{V}O_2$max) ? Nous nous sommes posé la question et avons commencé à utiliser ce protocole dès 1998 avec nos athlètes et étudiants et à vérifier, à chaque fois, que les choses se passaient bien ainsi.

Le modèle Gibala

Il a fallu attendre que des esprits curieux d'une université canadienne fassent une nouvelle expérience pour avancer un peu sur cette énigme. Il faut dire qu'ils n'en sont pas à leur premier coup d'éclat dans la Belle Province, car Tremblay et coll. (52-54) de l'université de Laval avaient déjà montré, dans le contexte de la perte de graisse et le métabolisme musculaire, que le HIIT était plus efficace que l'entraînement d'endurance classique (continu).

Là, c'est l'équipe de Gibala qui est partie explorer les frontières du métabolisme énergétique et recueillir de très nombreuses données (3-6, 19, 20), confirmées par d'autres équipes dans le domaine sportif ou pathologique.

L'étude qui a été la plus représentative est celle dont nous avons indiqué le protocole ci-après (Tableau 3). Il s'agit de comparer les effets de deux protocoles : un entraînement classique de course en continu à 65% du $\dot{V}O_2$max et un entraînement utilisant un exercice supra-maximal, le test de Wingate (WAnT), consistant en un sprint sur ergocycle de 30 secondes contre une résistance équivalente à 7,5 % de la masse corporelle. Ce sprint est répété 4 à 6 fois dans la programmation et entrecoupé de 4 minutes de récupération passive ou contre une résistance de seulement 30 W selon le ressenti du sujet.

À droite, nous avons comparé les paramètres mesurés 2 à 2 (ratio) entre l'entraînement par intervalle en sprint (SIT) et l'entraînement en endurance sur longue distance (ET). Par exemple, on note que le SIT se fait à une intensité 4 fois supérieure à celle de ET, que la durée d'exercice par séance sans la récupération est 30 à 40 fois inférieure pour SIT comparé à ET. Avec la récupération intraséance (entre les répétitions), on reste à une séance SIT 3 à 4 fois inférieure en durée à celle faite en ET.

Pour ce qui concerne le travail réalisé sur les 2 semaines d'entraînement, c'est encore plus impressionnant. La durée totale d'exercice effectif (sans les récupérations) est 42 fois inférieure dans le SIT par rapport au ET. Ne parlons pas de la dépense énergétique 7 à 10 fois inférieure avec le SIT selon que l'on inclue ou pas les récupérations.

PROTOCOLES D'ENTRAÎNEMENT

Paramètres	Groupe SIT	Groupe ET
Intensité de travail	Sprint supramaximal (~700 w)	65 % $\dot{V}O_2$max (~175 w) x 4
Protocole d'exercice (par session)	30 s x 4-6 répétitions, 4 min récupération	90-120 min d'exercice continu
Durée totale exercice/ Durée de travail par cession	2-3 min (exercice seulement) 18-27 min (récup. incluse)	90-120 min ➞ / 30 à 40 90-120 min ➞ / 3 à 4
Durée totale exercice/ Durée de travail par cession	**15 min (exercice seulement) 135 min (récup. incluse)**	**630 min ➞ / 42 630 min ➞/ 4,7**
Volume[1] total d'exercice sur 2 semaines	~630 kj (exercice seulement) ~950 kj (récup. incluse)[2]	~6500 kj ➞ / 10 ~6500 kj ➞ / 7

SIT, entraînement de sprint par intervalle ; ET : entraînement d'endurance ; $\dot{V}O_2$ max, débit maxi d'oxygène.
[1]Basée sur les charges de travail moyennes, maintenues durant l'entraînement.
[2]En supposant que les sujets ont inclus une charge maximale autorisée durant la récupération de 30 Watts pour une durée maximale de 4 minutes après chaque sprint réalisé durant l'entraînement (total = 30 exercices par intervalles sur 2 semaines).

Tableau 17 : Comparaison des deux protocoles (SIT vs ET) de l'expérience réalisée par Gibala et coll. (19).

Quel intérêt de faire des sprints sur ergocycle ? Un petit calcul rapide et une règle de trois permettent de comprendre. On résume le calcul par le Tableau 18.

% max	Watt	km/h	m/s	400 m
65 %	175	11,2	3,1	02:09
100 %	269	17,2	4,8	01:24
260 %	700	44,7	12,4	00:32

Tableau 18 : Comparaison des intensités de course entre SIT et ET pour un individu ayant une VAM de 17,2 km/h et pesant 75 kg et ayant un $\dot{V}O_2$max de 51,6 ml/min/kg.

Pour dépenser les 700 W sur 30 secondes comme dans le protocole de Gibala et coll., il faudrait que le sujet parcoure l'équivalent de 400 m en 32 secondes ou le 100 m en 8 secondes. Rappelons seulement que le record du monde de 400 m détenu depuis 1999 par Michael Johnson à Séville est de 43 s 18'' ! Autant dire que c'est impossible pour un individu lambda (vive le vélo !) ! Après la période d'entraînement, soit 6 séances réparties sur 14 jours avec 1 à 2 jours de récupération entre chaque (les lundi-mercredi-vendredi), les résultats sont au final similaires pour les deux formes de sollicitation : même augmentation des enzymes mitochondriales impliquées dans les mécanismes oxydatifs, même amélioration de l'endurance ou de l'effet tampon au niveau musculaire par rapport au pH (représentatif des capacités de tolérance à l'exercice (27)), même augmentation du stock de glycogène.

Ces résultats confirment ceux de leurs études précédentes (4, 6) et leurs suivantes (17, 32, 37, 38) ou celles d'autres auteurs s'étant intéressés au travail intermittent seul (7, 10, 14, 33, 48, 55).

Lorsque l'on est fainéant ou que l'on s'intéresse à l'optimisation de la charge d'entraînement, la question qui vient logiquement, en voyant ces résultats étonnants, est la suivante : faut-il tenir à tout prix les 30 secondes sachant que, classiquement lors d'un test de Wingate, la puissance maximale (Pmax) est atteinte dans les 10 premières secondes et qu'ensuite elle ne fait que diminuer jusqu'à la fin des 30 s, donnant ainsi un indice de fatigue anaérobie (IF = (Pmax – P30)/Pmax) ?

Eh bien, c'est exactement cette question que se sont posée d'autres Canadiens (30) en testant cette hypothèse : est-ce que 10 s sont aussi efficaces que 30 s ? Ils se sont "amusés" avec les temps de récupération en faisant soit 2 min, soit 4 min entre chaque sprint de 10 s ou 30 s selon les combinaisons suivantes d'alternance travail-repos : 30:4, 10:4, 10:2, le protocole 30:4 étant celui initialement utilisé par l'équipe de Gibala et coll.
Et voici le tableau 19 des résultats :

Variables	30:4	10:4	10:2
Temps au 5 km en vélo	5,2 % ***	3,5 % **	3,0 % **
V̇O₂max	9,3 % ***	9,2 % ***	3,8 % (NS)
Pic de puissance en W.kg-1	9,5 % ***	8,5 % ***	4,2 % **
Puissance moyenne en W.kg-1	12,1 % ***	6,5 % ***	4,2 % (NS)
Reproductibilité du pic	89 % ***	96 % ***	95 % ***
Puissance minimale (en % de Pmax)	40 %	73 % §	69 % §
Valeur de p = *** < 0,001 ; ** < 0,01 , * < 0,05 , NS : non significatif. § valeur significativement différente à celle de 30:4			

Tableau 19

La conclusion est claire : le protocole 10:4 est aussi efficace que le protocole 30:4 ; le protocole 10:2 est intéressant pour certains aspects mais est peu convaincant pour d'autres. *Faire des sprints de 10 s au lieu de 30 s, avec une récupération de 4 min, donne des résultats similaires, hormis pour le temps au 5 km qui est un tout petit peu meilleur pour le protocole à 30 s.*

Ces données montrent qu'un exercice supra-maximal améliore autant les processus énergétiques aérobie qu'un exercice sous-maximal, en améliorant en plus les processus énergétiques anaérobie, chose qui va à l'opposé du principe des filières, de la spécificité de l'entraînement et des classifications des méthodes d'entraînement que l'on propose généralement dans les ouvrages de physiologie. Comment interpréter de telles données sans y perdre son latin ? Comment réconcilier ces faits avec la théorie ?

Un nouveau principe d'entraînement ?

Nous pensons que la solution est de se placer en méta-position, de prendre un peu de hauteur, et de revenir sur des travaux déjà anciens mais ô combien intéressants pour nous. D'ailleurs, c'est souvent le cas. Des personnes avant-gardistes ont imaginé des effets, proposé des concepts, avancé des hypothèses qui ne sont vérifiées que beaucoup plus tard après avoir été soit ignorées, soit rejetées car incompatibles avec la pensée dominante de l'époque… ce que nous avons appelé une position dogmatique un peu plus haut dans cette partie.

Faisons juste un petit pas dans l'histoire des sciences avant de vous proposer notre vision des choses, vision qui est une interprétation des faits, rien d'autre. Pas question ici de prendre position pour telle ou telle théorie. Pensez simplement à l'opposition farouche que l'histologiste espagnol Ramón y Cajal a manifestée contre la régénération des neurones, lui, prix Nobel de physiologie ou médecine en 1906 !

Et pourtant… en 1962, Altman apporte les premières preuves de nouveaux neurones dans le cerveau du rat adulte. En 1980, Kaplan apporte les siennes concernant la division cellulaire dans deux régions du cerveau (zone sous-ventriculaire et gyrus dentelé situé dans l'hippocampe), ainsi que le cortex visuel. Douze ans plus tard, en 1992 donc, Reynolds et Weiss mettent en évidence des cellules souches au sein du cerveau de souris adultes pouvant se différencier soit en neurones, soit en astrocytes. Puis c'est l'accélération des expériences à cause d'un intérêt soudain pour ces effets qui étaient déjà proposés 30 ans plus tôt… pour admettre ENFIN, près de 90 ans plus tard, l'existence du phénomène de plasticité cérébrale ! Tout cela parce qu'une position dominante bridait les chercheurs, empêchait d'admettre l'impensable (Altman a publié ses résultats dans une revue qui n'avait rien à voir avec sa spécialité pour ne pas subir les critiques de ses collègues de l'époque !). Imaginez : si l'on découpe en tranches de 5 ans la période qui sépare la première publication sur la neurogenèse chez le sujet adulte, on s'aperçoit que 60% des articles se sont faits ces

5 dernières années (sans prendre en compte la dernière tranche dans laquelle nous sommes encore).

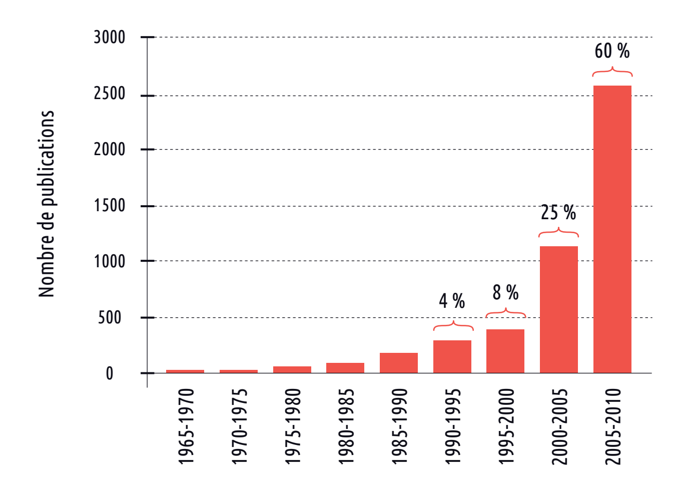


Figure 47 : Évolution des publications internationales sur la neurogenèse chez le sujet adulte par tranches de 5 années depuis 1965.

Reprenons maintenant le cours de notre raisonnement et admettons simplement que la vision du métabolisme musculaire proposée dans les ouvrages soit intéressante d'un point de vue pédagogique par la segmentation qu'elle met en avant. Nous pensons qu'elle n'en reste pas moins réductrice quant aux interactions qui sont découvertes tous les jours dans les différentes parties de la cellule musculaire et des tissus alentours.

Si l'on reprend les travaux d'un certain Selye, celui qui est à l'origine du concept de "stress", ou plus précisément du "syndrome général d'adaptation" (43-47), on peut comprendre les faits exposés plus haut. Considérons l'exercice physique comme un stresseur, c'est-à-dire comme un événement qui oblige l'organisme à mobiliser ses ressources pour faire face à une situation inhabituelle et/ou agressive.

Pour l'organisme, faire une séance de 120 min à 65 % (LSD) ou une séance de 6 sprints à fond de 30'' avec une récupération de 4 min entre chaque répétition (SIT), c'est la "même chose". D'un point de vue métabolique, le stress TOTAL ou GLOBAL imposé par les deux charges de travail est équiva-

lent. Les résultats en termes d'adaptation seront donc les mêmes. Simplement, le stress imposé par unité de temps (ici on prendra des tranches de 10 s) par le LSD étant faible comparé au SIT, il faudra plus de répétitions de tranches de 10 s pour obtenir le même niveau de réaction cellulaire du fait qu'on est en sous-maximal. C'est ce qu'ont montré les résultats obtenus en biologie moléculaire (1, 21, 36, 38) : les deux formes d'entraînement agissent sur les mêmes cibles, mais la réponse des gènes au stresseur LSD est beaucoup plus faible que celle provoquée par le stresseur SIT.

C'est aussi ce que montrent d'autres travaux récents qui abondent dans le même sens. Par exemple, un entraînement de 8 x 4 min à 85% de la puissance maximale aérobie (PMA) produira les mêmes effets que 12 x 30 s à 175 % de la PMA ou encore 10 x 1 min au $\dot{V}O_2$max. Une combinaison de 7 répétitions de 30 s à fond aura la même efficacité, sinon plus d'efficacité, que 3 x 20 min à 87 % de $\dot{V}O_2$max chez des cyclistes entraînés (35, 41, 42).

Voici donc un exemple de ***travail qualitatif : diminution volume + augmentation intensité***, avec des séances plus courtes pour une même efficacité ou une efficacité supérieure. La figure issue d'une publication ancienne de Coyle (12), modifiée par nos soins, résume assez bien la situation.

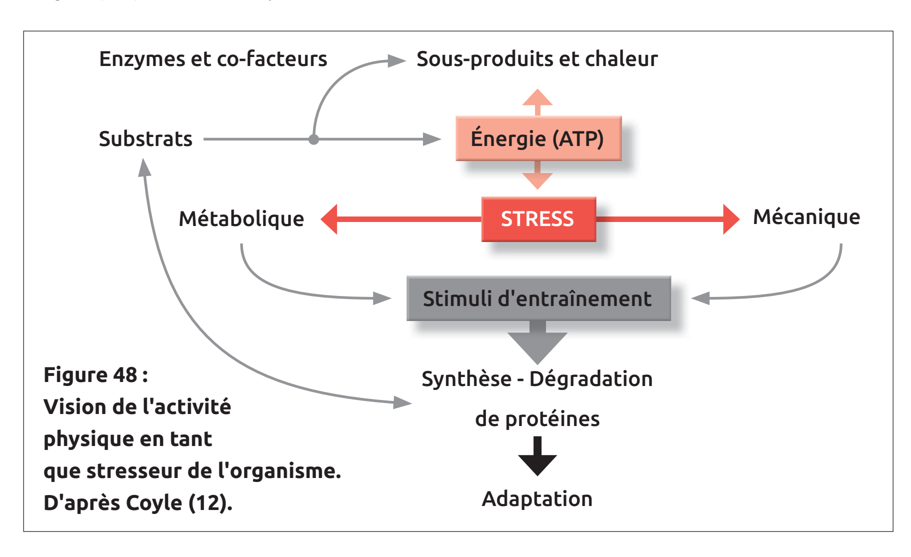


Figure 48 : Vision de l'activité physique en tant que stresseur de l'organisme. D'après Coyle (12).

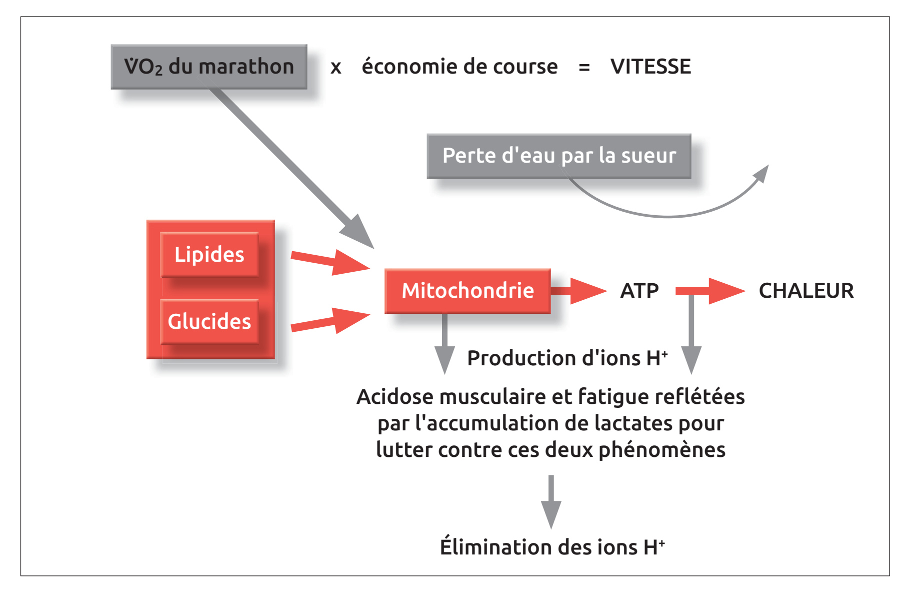


Figure 49 : Modèle du stresseur appliqué à la physiologie du marathon. D'après Coyle (13).

La contrepartie ? Avec un SIT, il faut s'attendre à ce qu'il y ait un côté obscur : la fatigue. Notamment si l'on ne gère pas bien la programmation du cycle (bloc de 6-8 séances), et en particulier dans sa place par rapport aux autres cycles. Les effets sont retardés de 2 à 5 jours selon le type de séance. (8-11, 18, 28, 29, 49).

ATTENTION donc à ne pas programmer de séance d'entraînement à haute intensité (HIT, SIT ou SMIT) pendant cette phase afin de laisser l'organisme reprendre possession de tous ses moyens et surtout veiller à lui apporter au niveau nutritionnel ce dont il a besoin pendant cette période pour améliorer ses capacités. Mais c'est une autre histoire... peut-être un autre ouvrage, qui sait ?

En conclusion, au vu des faits et résultats exposés dans cette dernière partie consacrée à l'endurance, nous souhaitons proposer d'adopter un nouveau principe d'entraînement qui rend compte de l'ensemble de ces

résultats : le ***principe d'équivalence.*** C'est, selon nous, la seule façon de redonner du sens à ce qui s'oppose en apparence seulement. Considérer l'organisme comme un tout qui mobilise l'ensemble de ses ressources pour faire face au stress de l'entraînement est une vision plus proche de la réalité physiologique telle que nous la découvrons aujourd'hui et que nous devrions garder à l'esprit pour améliorer encore et toujours la programmation de nos séances. Certains auteurs proposent même de l'inclure systématiquement selon un ratio annuel de 1 pour 5 par rapport au travail à intensité sous-maximale (25, 34).

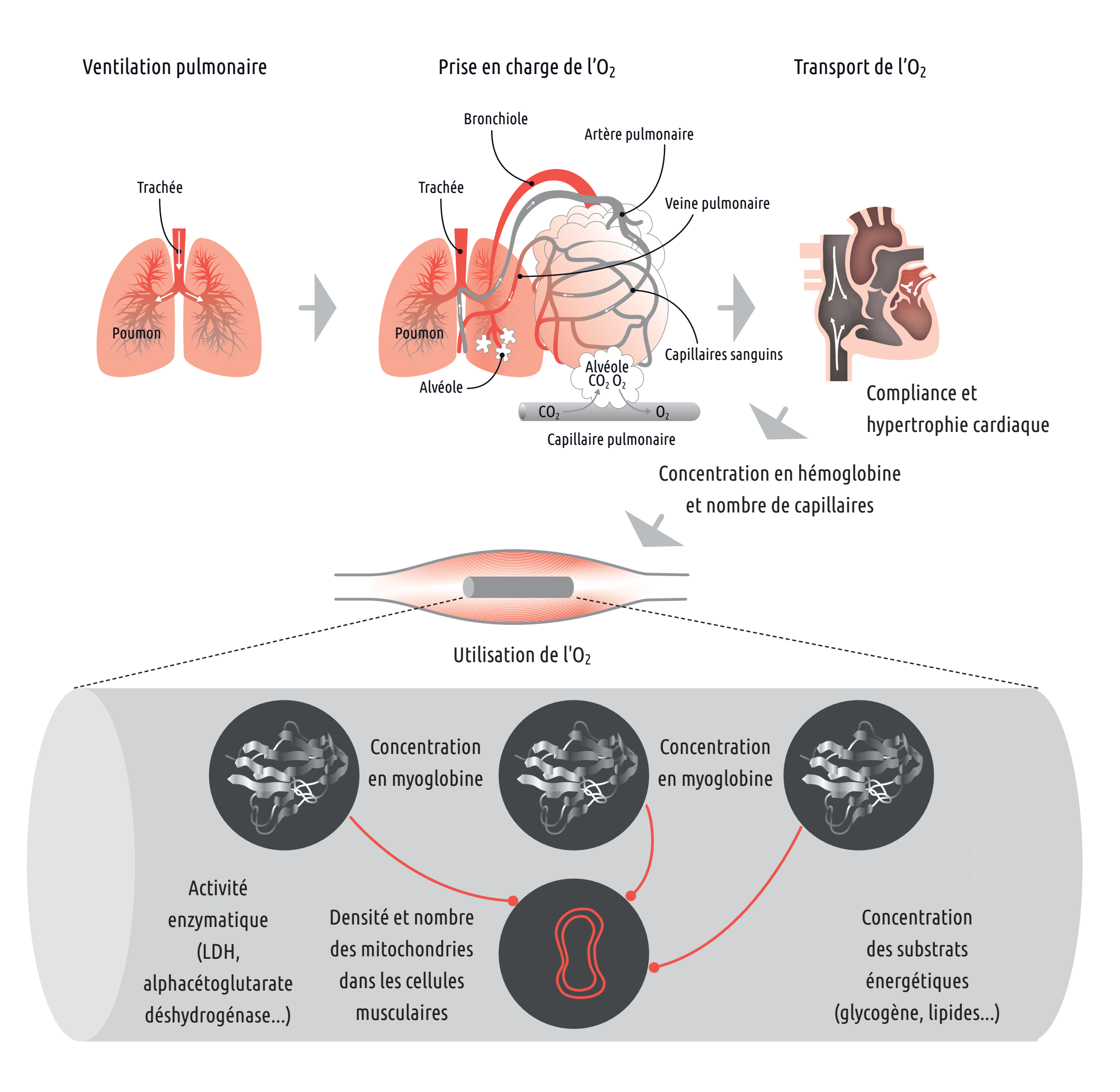
Que de chemin parcouru depuis les années 70 où le Dr Woldemar Gerschler introduisit le concept de travail par intervalles avec le succès qu'on lui a connu par la suite. Mais la boucle est quasiment bouclée. La seconde révolution en marche est celle utilisant le HIIT avec le public non sportif. Mais cela sort du cadre de cet ouvrage même si nous l'avons déjà abordé en 2009 dans une conférence lors d'un congrès de médecine du sport et que le lien est tout trouvé avec les préoccupations qui sont les nôtres depuis des années : le respect de l'intégrité physique de l'athlète quel que soit son niveau de pratique. Si nous avons avec ce principe d'équivalence le moyen d'alléger la charge de travail et de moins user l'organisme, alors pourquoi s'en priver ?

Vision globale

La prise en charge de l'oxygène est complexe, toutes les méthodes ont une influence à une des étapes du $\dot{V}O_2max$ (ou du transport de l'oxygène).

La capacité va influencer les transporteurs de l'oxygène, la puissance de son utilisation. Avoir l'image ci-contre en tête permet de garder en mémoire que rien n'est exclusif. Il va falloir jouer sur tous les facteurs de transport de l'oxygène en choisir la dominante par rapport à l'activité.

Figure 50 : Le V̇O₂max : l'amélioration du V̇O₂ passe par différentes étapes



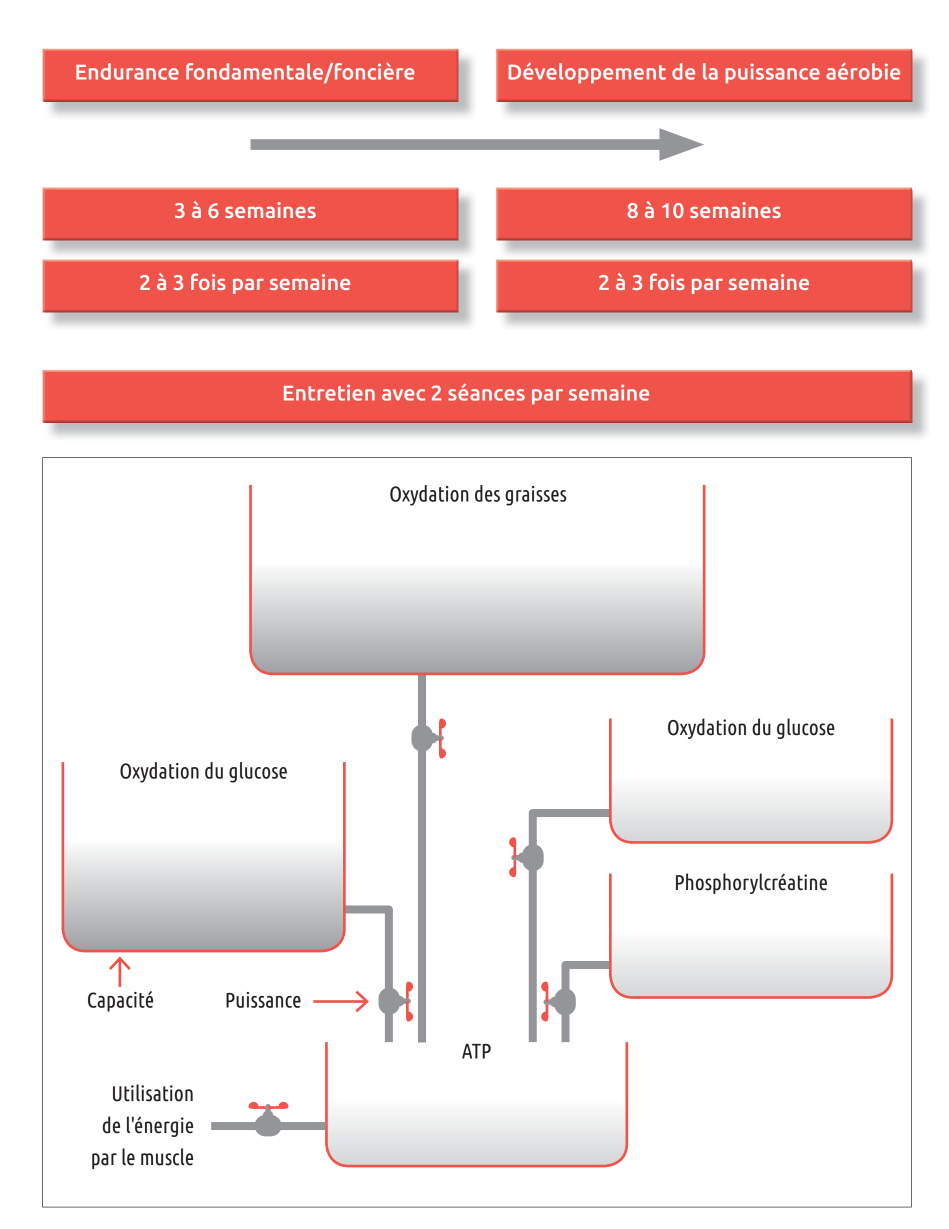


Figure 51 : Si nous devions imager l'endurance, il faudrait visualiser l'image ci-dessus et se dire que l'entraînement vise à développer les aspects dessinés. Augmenter la taille des réservoirs, augmenter la taille des tuyaux et ouvrir davantage les robinets.

Bibliographie

• 1 • Bartlett JD, Hwa Joo C, Jeong TS, Louhelainen J, Cochran AJ, Gibala MJ, Gregson W, Close GL, Drust B, and Morton JP. Matched work high-intensity interval and continuous running induce similar increases in PGC-1alpha mRNA, AMPK, p38, and p53 phosphorylation in human skeletal muscle. J Appl Physiol 112: 1135-1143, 2012.

• 2 • Billaut F and Bishop D. Muscle Fatigue in Males and Females during Multiple-Sprint Exercise. Sports Medicine 39: 257-278 210.2165/00007256-200939040-200900001, 2009.

• 3 • Burgomaster KA, Cermak NM, Phillips SM, Benton CR, Bonen A, and Gibala MJ. Divergent response of metabolite transport proteins in human skeletal muscle after sprint interval training and detraining. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 292: R1970-1976, 2007.

• 4 • Burgomaster KA, Heigenhauser GJ, and Gibala MJ. Effect of short-term sprint interval training on human skeletal muscle carbohydrate metabolism during exercise and time-trial performance. J Appl Physiol 100: 2041-2047, 2006.

• 5 • Burgomaster KA, Howarth KR, Phillips SM, Rakobowchuk M, Macdonald MJ, McGee SL, and Gibala MJ. Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. J Physiol 586: 151-160, 2008.

• 6 • Burgomaster KA, Hughes SC, Heigenhauser GJ, Bradwell SN, and Gibala MJ. Six sessions of sprint interval training increases muscle oxidative potential and cycle endurance capacity in humans. J Appl Physiol 98: 1985-1990, 2005.

• 7 • Chesley A, Heigenhauser GJ, and Spriet LL. Regulation of muscle glycogen phosphorylase activity following short-term endurance training. Am J Physiol 270: E328-335, 1996.

• 8 • Coffey VG and Hawley JA. Training for performance: insights from molecular biology. Int J Sports Physiol Perform 1: 284-292, 2006.

• 9 • Coffey VG and Hawley JA. The Molecular Bases of Training Adaptation. Sports Medicine 37: 737-763, 2007.

• 10 • Coffey VG, Jemiolo B, Edge J, Garnham AP, Trappe SW, and Hawley JA. Effect of consecutive repeated sprint and resistance exercise bouts on acute adaptive responses in human skeletal muscle. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 297: R1441-1451, 2009.

• 11 • Coffey VG, Reeder DW, Lancaster GI, Yeo WK, Febbraio MA, Yaspelkis BB, 3rd, and Hawley JA. Effect of high-frequency resistance exercise on adaptive responses in skeletal muscle. Med Sci Sports Exerc 39: 2135-2144, 2007.

• 12 • Coyle EF. Physical activity as a metabolic stressor. Am J Clin Nutr 72: 512S-520S, 2000.

• 13 • Coyle EF. Physiological Regulation of Marathon Performance. Sports Medicine 37: 306-311, 2007.

• 14 • Eddy DO, Sparks KL, and Adelizi DA. The effects of continuous and interval training in women and men. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 37: 83-92, 1977.

• 15 • Faude O, Kindermann W, and Meyer T. Lactate Threshold Concepts: How Valid are They? Sports Medicine 39: 469-490 410.2165/00007256-200939060-200900003, 2009.

• 16 • Franch J, Madsen K, Djurhuus MS, and Pedersen PK. Improved running economy following intensified training correlates with reduced ventilatory demands. Med Sci Sports Exerc 30: 1250-1256, 1998.

• 17 • Gibala MJ and Little JP. Just HIT it! A time-efficient exercise strategy to improve muscle insulin sensitivity. J Physiol 588: 3341-3342, 2010.

• 18 • Gibala MJ, Little JP, Macdonald MJ, and Hawley JA. Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. J Physiol 590: 1077-1084, 2012.

• 19 • Gibala MJ, Little JP, van Essen M, Wilkin GP, Burgomaster KA, Safdar A, Raha S, and Tarnopolsky MA. Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. J Physiol 575: 901-911, 2006.

• 20 • Gibala MJ and McGee SL. Metabolic Adaptations to Short-term High-Intensity Interval Training: A Little Pain for a Lot of Gain? Exercise and sport sciences reviews 36: 58-63 10.1097/JES.1090b1013e318168ec318161f, 2008.

• 21 • Gibala MJ, McGee SL, Garnham AP, Howlett KF, Snow RJ, and Hargreaves M. Brief intense interval exercise activates AMPK and p38 MAPK signaling and increases the expression of PGC-1alpha in human skeletal muscle. J Appl Physiol 106: 929-934, 2009.

• 22 • Gonzalez-Haro C, Galilea Ballarini PA, Soria M, Drobnic F, and Escanero JF. Comparison of nine theoretical models for estimating the mechanical power output in cycling. Br J Sports Med 41: 506-509; discussion 509, 2007.

• 23 • Gonzalez-Haro C, Galilea PA, and Escanero JF. Comparison of different theoretical models estimating peak power output and maximal oxygen uptake in trained and elite triathletes and endurance cyclists in the velodrome. J Sports Sci 26: 591-601, 2008.

• 24 • Gormley SE, Swain DP, High R, Spina RJ, Dowling EA, Kotipalli US, and Gandrakota R. Effect of intensity of aerobic training on VO_2max. Med Sci Sports Exerc 40: 1336-1343, 2008.

• 25 • Guellich A, Seiler S, and Emrich E. Training methods and intensity distribution of young world-class rowers. Int J Sports Physiol Perform 4: 448-460, 2009.

• 26 • Harmer AR, McKenna MJ, Sutton JR, Snow RJ, Ruell PA, Booth J, Thompson MW, Mackay NA, Stathis CG, Crameri RM, Carey MF, and Eager DM. Skeletal muscle metabolic and ionic adaptations during intense exercise following sprint training in humans. J Appl Physiol 89: 1793-1803, 2000.

• 27 • Hawley JA. Adaptations of skeletal muscle to prolonged, intense endurance training. Clinical and experimental pharmacology & physiology 29: 218-222, 2002.

• 28 • Hawley JA and Spargo FJ. Metabolic Adaptations to Marathon Training and Racing. Sports Medicine 37: 328-331, 2007.

• 29 • Hawley JA, Tipton KD, and Millard-Stafford ML. Promoting training adaptations through nutritional interventions. J Sports Sci 24: 709-721, 2006.

• 30 • Hazell TJ, Macpherson RE, Gravelle BM, and Lemon PW. 10 or 30-s sprint interval training bouts enhance both aerobic and anaerobic performance. Eur J Appl Physiol 110: 153-160, 2010.

• 31 • Helgerud J, Hoydal K, Wang E, Karlsen T, Berg P, Bjerkaas M, Simonsen T, Helgesen C, Hjorth N, Bach R, and Hoff J. Aerobic high-intensity intervals improve $\dot{V}O_2$max more than moderate training. Med Sci Sports Exerc 39: 665-671, 2007.

• 32 • Hood MS, Little JP, Tarnopolsky MA, Myslik F, and Gibala MJ. Low-volume interval training improves muscle oxidative capacity in sedentary adults. Med Sci Sports Exerc 43: 1849-1856, 2011.

• 33 • Houston ME, Wilson DM, Green HJ, Thomson JA, and Ranney DA. Physiological and muscle enzyme adaptations to two different intensities of swim training. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 46: 283-291, 1981.

• 34 • Laursen PB. Training for intense exercise performance: high-intensity or high-volume training? Scand J Med Sci Sports 20 Suppl 2: 1-10, 2010.

• 35 • Lindsay FH, Hawley JA, Myburgh KH, Schomer HH, Noakes TD, and Dennis SC. Improved athletic performance in highly trained cyclists after interval training. Med Sci Sports Exerc 28: 1427-1434, 1996.

• 36 • Little JP, Safdar A, Bishop D, Tarnopolsky MA, and Gibala MJ. An acute bout of high-intensity interval training increases the nuclear abundance of PGC-1alpha and activates mitochondrial biogenesis in human skeletal muscle. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 300: R1303-1310, 2011.

• 37 • Little JP, Safdar A, Cermak N, Tarnopolsky MA, and Gibala MJ. Acute endurance exercise increases the nuclear abundance of PGC-1alpha in trained human skeletal muscle. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 298: R912-917, 2010.

• 38 • Little JP, Safdar A, Wilkin GP, Tarnopolsky MA, and Gibala MJ. A practical model of low-volume high-intensity interval training induces mitochondrial biogenesis in human skeletal muscle: potential mechanisms. J Physiol 588: 1011-1022, 2010.

• 39 • MacDougall JD, Hicks AL, MacDonald JR, McKelvie RS, Green HJ, and Smith KM. Muscle performance and enzymatic adaptations to sprint interval training. J Appl Physiol 84: 2138-2142, 1998.

• 40 • Peronnet F. Aspects métaboliques des exercices continus et intermittents de courtes et de longues durées. Les interactions des métabolismes aérobie et anaérobie lactacides., in: Evaluation physiologique et traumatologie en sport Colloque Aquitaine Sciences et Sports. MC Allard, G.; Chaveau, D.; Dine, G.; Distinguin, F.; Dolle, G.; Dubourg, R.; Jousselin, E.; Lacour, J.R.; Laporte, G.; Leger, L.; Montpetit, R.; Péronnet, F.; Porte, G.; Senegas, J.; Stoicheff, H.; Vignes, J.; Walch, G.;, ed. Bordeaux: AREAPS, 1992.

• 41 • Psilander N, Frank P, Flockhart M, and Sahlin K. Exercise with low glycogen increases PGC-1alpha gene expression in human skeletal muscle. Eur J Appl Physiol, 2012.

• 42 • Psilander N, Wang L, Westergren J, Tonkonogi M, and Sahlin K. Mitochondrial gene expression in elite cyclists: effects of high-intensity interval exercise. Eur J Appl Physiol 110: 597-606, 2010.

• 43 • Selye H. Stress and the general adaptation syndrome. Br Med J 1: 1383-1392, 1950.

• 44 • Selye H. [The concept of stress as it appears in 1952]. Bruxelles medical 32: 2383-2392, 1952.

• 45 • Selye H and Fortier C. Adaptive reactions to stress. Research publications - Association for Research in Nervous and Mental Disease 29: 3-18, 1949.

• 46 • Selye H and Fortier C. Adaptive reaction to stress. Psychosomatic medicine 12: 149-157, 1950.

• 47 • Selye H and Procopio J. [Concept of stress in 1951]. Hospital (Rio J) 40: 863-872, 1951.

• 48 • Simoneau JA, Lortie G, Boulay MR, Marcotte M, Thibault MC, and Bouchard C. Effects of two high-intensity intermittent training programs interspaced by detraining on human skeletal muscle and performance. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 56: 516-521, 1987.

• 49 • Stepto NK, Carey AL, Staudacher HM, Cummings NK, Burke LM, and Hawley JA. Effect of short-term fat adaptation on high-intensity training. Med Sci Sports Exerc 34: 449-455, 2002.

• 50 • Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M, Nishimura K, Ogita F, and Miyachi M. Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. Med Sci Sports Exerc 29: 390-395, 1997.

• 51 • Tabata I, Nishimura K, Kouzaki M, Hirai Y, Ogita F, Miyachi M, and Yamamoto K. Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and $\dot{V}O_2$max. Med Sci Sports Exerc 28: 1327-1330, 1996.

• 52 • Tremblay A, Despres JP, Leblanc C, Craig CL, Ferris B, Stephens T, and Bouchard C. Effect of intensity of physical activity on body fatness and fat distribution. Am J Clin Nutr 51: 153-157, 1990.

• 53 • Tremblay A, Simoneau JA, and Bouchard C. Impact of exercise intensity on body fatness and skeletal muscle metabolism. Metabolism 43: 814-818, 1994.

• 54 • Yoshioka M, Doucet E, St-Pierre S, Almeras N, Richard D, Labrie A, Despres JP, Bouchard C, and Tremblay A. Impact of high-intensity exercise on energy expenditure, lipid oxidation and body fatness. Int J Obes Relat Metab Disord 25: 332-339, 2001.

• 55 • Youngren JF, Keen S, Kulp JL, Tanner CJ, Houmard JA, and Goldfine ID. Enhanced muscle insulin receptor autophosphorylation with short-term aerobic exercise training. Am J Physiol Endocrinol Metab 280: E528-533, 2001.

4

Comment perdre du poids ?

Sommaire

Apports de connaissances 197

Introduction 197
Influence du poids 198
Méthodes de mesure 200
Ce qu'on nous dit 204
Ce qu'on devrait nous dire 219
Nutrition de base 224
Mobilisation des graisses 226
Brûlage des graisses 228

Bibliographie 232

Apports de connaissances

Introduction

Avant de partir dans un "gros" chapitre, il faut remettre un contexte.

Pourquoi prendre le temps d'épiloguer sur la perte de poids dans un livre sur la préparation physique sportive ?
Nous parlons de la classe des sportifs, a priori les moins concernés par les problèmes de surpoids. Nous avons l'image de personnes qui font attention à leur alimentation, pratiquent des heures intensives d'entraînement, donc dépensent de l'énergie.

Certes, mais la réalité est toute autre.

Premièrement, le sportif compétiteur est en général assez jeune, peu soucieux des aspects santé de l'alimentation. Il peut enchaîner les pires aliments en termes d'index glycémique et de produits chimiques rajoutés pour diverses raisons (les émulsifiants), plus ou moins mauvais pour la santé.

Deuxièmement, les spécialistes de la vente font très bien leur travail. Le sportif se sent obligé de prendre toute une pléthore de compléments industriels ou de boissons de l'effort (sucrés). Nous ne voulons pas transformer ce chapitre en une partie consacrée à la diététique. **Mais il existe des informations essentielles à connaître. Pour cela, nous vous conseillons la lecture d'ouvrages comme celui de Walter Willet (Manger, boire et vivre en bonne santé, Les Éditions de l'Homme).**

Pour terminer, toutes les générations se suivent et se ressemblent et nous voyons les mêmes erreurs se reproduire. Les athlètes des sports à catégories de poids souffrent de régimes drastiques afin d'être au poids optimal le jour de la compétition avec les conséquences que cela induit : perte de force, fatigue, contre-performance... Cela concerne la gymnastique, la danse, mais aussi le rugby, les sports de performance dont le poids

influence directement le résultat. Pensez-vous que le 100 m ou le saut en hauteur avec une combinaison lestée offrent le même chrono ou la même hauteur ? Le marathon se coure-t-il dans le même temps avec 1 kg de plus ?

Influence du poids

Les scientifiques ont déjà mesuré les préjudices du poids sur la performance. Nous proposons le tableau ci-dessous issu d'une conférence sur la perte de poids qu'offrait Véronique Rousseau à l'INSEP. Ce tableau se retrouve dans son ouvrage.

Hommes	Femmes	MG
% MG < 8	% MG < 18	% faible
8 < % MG < 10	18 < % MG < 20	% optimal
10 < % MG < 12	20 < % MG < 22	% non négligeable
12 < % MG < 14	22 < % MG < 24	% élevé
% MG > 14	% MG > 24	% très élevé

Tableau 1 : Influence du % de graisse sur la performance.

Nous sommes bien loin des tableaux des moyennes de la population où il est considéré comme normal (statistiquement en tout cas) d'être à 15 % de graisse pour un homme et 23 % pour une femme, à 20 ans. Il est important de souligner que l'âge influence cette "normalité".

	Femme			Homme		
Âge	Bas	Moyen	Élevé	Bas	Moyen	Élevé
20/24	18-22	22-25	25-30	11-15	15-19	19-24
25/29	19-22	22-26	26-30	12-17	17-21	21-25
30/34	20-23	23-27	27-31	14-18	18-22	22-25
35/39	21-24	24-28	28-31	16-20	20-23	23-26
40/44	23-26	26-30	30-33	17-21	21-24	24-27
45/49	24-27	27-31	31-35	18-22	22-25	25-28
50/59	27-30	30-33	33-36	20-23	23-26	26-29
>60	28-31	31-34	34-38	20-23	23-26	26-30

Tableau 2 : Valeurs moyennes en % de la graisse corporelle en fonction de l'age et du sexe.

Une critique de l'IMC

L'indice de masse corporel ou Indice de Quetelet (astronome et mathématicien Belge, inventeur des statistiques modernes) apparut en 1869. Les Anglo-saxons parlent du "BMI" (Body Mass Index). Quetelet établit une corrélation entre la corpulence et l'état de santé à l'aide d'un indice. Ce dernier est obtenu par un rapport du poids et de la taille (kg)/(m)^2.

$$IMC\ (kg/m^2) = Poids\ (kg)\ /\ Taille\ (m)^2$$

Au départ, c'était un classement pour départager la population. Ce n'est pas un indice scientifiquement pertinent et pourtant l'OMS en a fait un standard en 1997.

Insuffisance pondérale	**IMC < 18.5**
Normal	**IMC 18.5 – 25**
Embonpoint	**IMC 25 – 30**
Obésité	**IMC > 30**
Obésité grade 1	**IMC 30 à 35**
Obésité grade 2	**IMC 35 à 40**
Obésité grade 3	**IMC >40**

Le problème est que, pour la population sportive, cet indice n'a aucune valeur réelle à fournir sur la composition corporelle du sportif. Nous ne sommes ni renseignés sur sa santé, ni sur sa masse musculaire ou graisseuse.

De plus, cette normalité a des limites. Par exemple, un homme de 1,70 m avec un poids de corps de 55 kg (IMC de 19) grossit de 17 kg de masse grasse (IMC de 24,9) ; il se retrouve statistiquement dans la norme. L'excès de masse grasse n'est jamais bénéfique pour la santé malgré une étude très controversée parue en janvier 2013.

D'ailleurs, de nouveaux index sont apparus depuis et ont été proposés en lieu et place de l'IMC. Parmi ceux-ci, deux semblent plus pertinents car ils ciblent l'obésité centrale (au niveau de l'abdomen) réputée la plus dangereuse pour la santé : index d'obésité centrale (57-59) et index d'adiposité corporelle (6). L'IMC a encore de beaux jours devant lui car les études à grande échelle sont en cours et peu nombreuses (23, 31, 64, 70, 71) et les querelles scientifiques le sont plus (2, 18, 21, 65).

Méthodes de mesure

Les techniques les plus précises permettant de connaître son pourcentage de masse grasse sont aussi les plus onéreuses et les plus contraignantes. Le DEXA (Dual Energy X-ray Absorptiometry) demande un rendez-vous dans un hôpital, c'est incompatible avec le suivi de terrain.
Personnellement, nous obtenons le pourcentage de masse grasse avec la mesure des plis adipeux. Nous déconseillons les autres méthodes comme l'IMC, les rations taille hanche, les balances à impédancemétrie bien que ces dernières, depuis quelques années, proposent des résultats proches de ceux obtenus avec les pinces à plis cutanés (ou "fat caliper") et renseignent également sur le pourcentage de masse maigre, de liquide, de masse musculaire, densité du squelette... Les balances à impédancemétrie requièrent des mesures dans des conditions assez strictes : pas d'augmentation de chaleur (exercice physique, bain, fin de course, sauna, fièvre), pas de prise de liquide juste avant sous quelque forme que ce soit (même une boisson alcoolisée qui contient plus de 90 % d'eau !). Soyez toujours dans les mêmes conditions, sinon vous risquez d'observer des augmentations de masse grasse ou musculaire spectaculaire au sein d'une même journée.
Effectuer une mesure avec les pinces demande de l'habitude. C'est le principal reproche que l'on fait à cet outil. Certes, l'évaluateur influence la mesure, mais l'attrait est aussi de se dire qu'une fois la routine installée, l'erreur de mesure sera toujours la même[19] ; cela devient donc un excellent moyen de suivre une évolution. Cependant, si vous voulez avoir une valeur plus valide, il faut se former à cette méthode d'anthropométrie pour apprendre à la faire correctement dès le début afin d'être plus sûr des résultats. Au final, des tests de terrain les plus fiables, nous conseillons la pince à plis cutanés. Parmi les équations disponibles, celle des 4 plis cutanés (80) reste à ce jour la plus validée bien qu'il existe 6, 8, 10 ou 12 plis... au moins. Trop de plis augmentent le risque d'erreur, 4 est donc un bon compromis. La mesure s'effectue toujours du même côté (habitude de mesure mais il peut y avoir une différence notable entre le côté dominant et le côté non dominant), les plis : bicipital (entre l'articulation et la moitié du bras

19 / Cf. chapitre sur l'évaluation concernant la validité et la fidélité.

antérieur), tricipital (entre l'articulation et la moitié du bras postérieur), sous-scapulaire (entre le bord médial inférieur de la scapula et le rachis, en oblique vers le bas) et supra-iliaque (épine iliaque antéro supérieur).
La somme mesurée en millimètres est reportée dans une formule. Si vous ne voulez pas créer l'outil de calcul sous un tableur, vous pouvez le télécharger sur le site Sciensport, rubrique "évaluation" ou vous servir du tableau 4 une fois la somme obtenue en mm, reportez-vous en fonction du sexe et de l'âge.

Exemple :
Homme de 25 ans ayant 3 mm sur le biceps, 3 sur le triceps, 10 en sous-scapulaire et 8 en supra-iliaque, il obtient un total de 24 mm = 16,3 %.

Mesure des plis cutanés Durnin & Womesley, (1974) (80)

Somme de 4 plis :
Tricipital : ....
Bicipital : ....
Sous-scapulaire : ....
Supra-iliaque : ....
Total en mm : ....

Pour trouver la densité (kg/m³), reporter les constantes C et M
(fonction de l'âge et du sexe, à lire dans les tableaux ci-dessous)
d = C - (M x log ∑ des 4 plis)
Pour trouver la masse grasse, reporter **d**.
Masse grasse = ((4,95/**d**) – 4,50) x 100
RESULTAT : .... %

Homme	C M	Femme	C M
17-19	d = 1,1620 – 0.0630 log ∑ des 4 plis	16-19	d = 1,1549 – 0,0678 log ∑ des 4 plis
20-29	d = 1,1631 – 0.0632 log ∑ des 4 plis	20-29	d = 1,1599 – 0,0717 log ∑ des 4 plis
30-39	d = 1,1422 – 0.0544 log ∑ des 4 plis	30-39	d = 1,1423 – 0,0632 log ∑ des 4 plis
40-49	d = 1,1620 – 0.0700 log ∑ des 4 plis	40-49	d = 1,1333 – 0,0612 log ∑ des 4 plis
50 -72	d = 1,1715 – 0.0779 log ∑ des 4 plis	50-68	d = 11,339 – 0,0645 log ∑ des 4 plis

Tableau 3

Tableau 4

Pourcentage de graisse en fonction de l'âge

Femmes (S = somme des 4 plis en mm)									
S	16-29	30-39	40-49	50-68	S	16-29	30-39	40-49	50-68
15	10,5				65	30,2	31,6	34,1	36,7
16	11,3				66	30,4	31,8	34,3	36,9
17	12,0				67	30,6	32,0	34,5	37,1
18	12,7				68	30,8	32,2	34,7	37,3
19	13,4				69	31,0	32,5	35,0	37,5
20	14,1	17,0	19,8	21,4	70	31,2	32,5	35,0	37,7
21	14,7	17,5	20,3	22,0	71	31,4	32,7	35,2	37,9
22	15,3	18,0	20,8	22,5	72	31,6	32,9	35,4	38,1
23	15,8	18,5	21,3	23,0	73	31,8	33,1	35,6	38.3
24	16,3	19,0	21,8	23,5	74	32,0	33,3	35,8	38,5
25	16,8	19,4	22,2	24,0	75	32,2	33,4	35,9	38,7
26	17,4	19,9	22,7	24,6	76	32,4	33,6	36,1	38.9
27	18,0	20,4	23,2	25,1	77	32,6	33,8	36,3	39,1
28	18,5	20,9	23,7	25,6	78	32,8	34,0	36,5	39,3
29	19,0	21,4	24,1	26,1	79	33,0	34,2	36,6	39,5
30	19,5	21,8	24,5	26,6	80	33,1	34,3	36,7	39,6
31	19,9	22,2	24,9	27,0	81	33,3	34,5	36,9	39.8
32	20,3	22,6	25,3	27,4	82	33,5	34,7	37,1	40,0
33	20,7	23,0	25,7	27,8	83	33,7	34,9	37,3	40,2
34	21,1	23,4	26,1	28,2	84	33,9	35,0	37,4	40,3
35	21,5	23,7	26,4	28,5	85	34,0	35,1	37,5	40.4
36	21,9	24,1	26,8	28,9	90	34,8	35,8	38,3	41,2
37	22,3	24,5	27,2	29,3	95	35,6	36,5	39,0	41,9
38	22,7	24,9	27,6	29,7	100	36,4	37,2	39,7	42,6
39	23,1	25,2	27,9	30,0	105	37,1	37,9	40,4	43,3
40	23,4	25,5	28,2	30,3	110	37,8	38,6	41.0	43,9
41	23,8	25,8	28,5	30,7	115	38,4	39,1	41,5	44,5
42	24.1	26,1	28,8	31,0	120	39,0	39,6	42,0	45,1
43	24,4	26,4	29,1	31,3	125	39,6	40,1	42,5	45,7
44	24,7	26,7	29,4	31,6	130	40,2	40,6	43,0	46,2
45	25,0	26,9	29,6	31,9	135	40,8	41,1	43,5	46,7
46	25,3	27,2	29,9	32,2	140	41,3	41,6	44,0	47,2
47	25,6	27,5	30,2	32,5	145	41,8	42,1	44,5	47,7
48	25,9	27,8	30,5	32,8	150	42,3	42,6	45,0	48,2
49	26,2	28,0	30,8	33,1	155	42,8	43,1	45,4	48,7
50	26,5	28,2	31,0	33,4	160	43,3	43,6	45,8	49,2
51	26,8	28,5	31,3	33,7	165	43,7	44,0	46,2	49,6
52	27,1	28,8	31,5	34,0	170	44,1	44,4	46,6	50,0
53	27,4	29,0	31,7	34,2	175		44,8	47,0	50,4
54	27,6	29,2	31,9	34,4	180		45,2	47,4	50,8
55	27,8	29,4	32,1	34,6	185		45,6	47,8	51,2
56	28,1	29,7	32,4	34,9	190		45,9	48,2	51,6
57	28,4	30,0	32,6	35,1	195		46,2	48,5	52,0
58	28,7	30,2	32,8	35,3	200		46,5	48,8	52,4
59	28,9	30,4	33,0	35,5	205		49,1	52,7	
60	29,1	30,6	33,2	35,7	210		49,4	53,0	
61	29,4	30,8	33,4	35,9					
62	29,6	31,0	33,6	36,1					
63	29,8	31,2	33,8	36,3					
64	30,3	31,4	34,0	36,5					

Tableau 5

Pourcentage de graisse en fonction de l'âge

Hommes (S = somme des 4 plis en mm)									
S	17-29	30-39	40-49	50-72	S	17-29	30-39	40-49	50-72
15	4,8				65	22,2	24,3	28,2	30,4
16	5,5				66	22,4	24,5	28,5	30,7
17	6,2				67	22,6	24,7	28,7	31,0
18	6,9				68	22,8	24,9	28,9	31,2
19	7,5				69	23,0	25,0	29,1	31,4
20	8,1	12,2	12,2	12,6	70	23,1	25,1	29,3	31,6
21	8,6	12,6	12,8	13,2	71	23,3	25,3	29,5	31,9
22	9,1	13,0	13,4	13,8	72	23,5	25,5	29,7	32,1
23	9,6	13,4	14,0	14,4	73	23,7	25,7	29,9	32,3
24	10,1	13,8	14,5	15,5	74	23,9	25,8	30,1	32,5
25	10,5	14,2	15,0	15,6	75	24,0	25,9	30,3	32,7
26	11,0	14,6	15,6	16,2	77	24,4	26,3	30,7	33,2
28	12,0	15,4	16,7	17,4	78	24,6	26,4	30,9	33,4
29	12,5	15,8	17,2	18,0	79	24,7	26,5	31,1	33,6
30	12,9	16,2	17,7	18,6	80	24,8	26,6	31,2	33,8
31	13,3	16,5	18,1	19,1	81	25,0	26,8	31,4	34,0
32	13.7	16,8	18,5	19,6	82	25,2	26,9	31,6	34,2
33	14.1	17,1	18,9	20,0	83	25,3	27,0	31,8	34,3
34	14,4	17,4	19,3	20,4	84	25,4	27,1	32,0	34,6
35	14,7	17,7	19,6	20,8	85	25,5	27,2	32,1	348
36	15.1	18,0	20,0	21,3	90	26,2	27,8	33,0	358
37	15,5	18,3	20,4	21,7	95	26,9	28,4	33,7	36,6
38	15.8	18,6	20,8	22,1	100	27,6	29,0	34,4	37,4
39	16,1	18,9	21,1	22,5	105	28,2	29,6	35,1	38,2
40	16,4	19,2	21,4	22,9	110	28,8	30,1	35,8	390
41	16,7	19,5	21,8	23,3	115	29,4	30,6	36,4	39 7
42	17,0	19,8	22,1	23,7	120	30,0	31,1	37,0	40,4
43	17.3	20,0	22,4	24,1	125	30,5	31,5	37,6	41,1
44	17,5	20,2	22,7	24,4	130	31,0	31,9	38,2	41,8
45	17,7	20,4	23,0	24,7	135	31,5	32,3	38,7	42,4
46	18,0	20,7	23,4	25,1	140	32,0	32,7	39,2	43,0
47	18,3	20,9	23,7	25,5	145	32,5	33,1	39,7	43,6
48	18,6	21,1	24,0	25,9	150	32,9	33,5	40,2	44,1
49	18,8	21,3	24,3	26,2	155	33,3	33,9	40,7	44,6
50	19,0	21,5	24,6	26,5	160	33,7	34,3	41,2	45,1
51	19,3	21,7	24,9	26,8	165	34,1	34,6	41,6	45,6
52	19,5	21,9	25,2	27,1	170	34,5	34,8	42,0	46,1
53	19,7	22,1	25,5	27,4	175	34,9			
54	19,9	22,3	25,7	27,7	180	35,3			
55	20,1	22,5	25,9	27,9	185	35,6			
56	20,4	22,7	26,2	28,2	190	35,9			
57	20,6	22,9	26,5	28,5	195				
58	20,8	23,1	26,7	28,8	200				
59	21,0	23,3	26,9	29,0	205				
60	21,2	23,5	27,1	29,2	210				
61	21,4	23,7	27,4	29,5					
62	21,6	23,9	27,6	29,8					
63	21,8	24,1	27,8	30,0					
64	22,0	24,2	28,0	30,2					

Ce qu'on nous dit…

Nous vivons une époque noyée par les informations entre la télévision et l'Internet. Il est à la fois facile de trouver rapidement des réponses à une question, mais il est tout aussi difficile d'en extraire une once de vérité. Sur un public mal formé à la recherche bibliographique, cela devient un casse-tête. Au final, l'expression "trop d'information, tue l'information" prend tout son sens.

La perte de poids étant un marché économique gigantesque, les publications scientifiques et publicitaires s'enchaînent. Les émissions de TV diffusent régulièrement cette thématique. Nous nous rappellerons longtemps de cette émission (qui se veut scientifique) de décembre 2010 consacrée à l'obésité chez les jeunes dans laquelle :

- il était conseillé de faire de l'exercice 2 fois 30 minutes par semaine sans trop forcer (c'est sûr que l'on ne va pas se faire mal avec cette quantité d'exercice) ;
- il était expliqué que la marche à 2 km/h consommait plus de graisse que les autres allures ;
- il était expliqué que 6 grammes de graisses seraient consommés durant les 30 minutes de marche ;
- il était conseillé de ne pas mettre trop lourd en musculation afin de ne pas obtenir des cuisses massives ; du coup, il était recommandé de faire des exercices classiques sans conseil de placement ;
- les repas préconisés démontraient une quantité calorique supérieure à la dépense, avec aucune contre-indication à la prise de boisson sucrée (mieux, elle était conseillée) et aucune notion de légumes dans les exemples.

Faisons quelques calculs rapides à partir de ces données :

- "marcher" à 2 km/h revient à parcourir 100 m en 3 min et à mettre 12 min pour faire le tour d'une piste d'athlétisme. Essayez seulement de "marcher" à 2 km/h… c'est tout simplement irréalisable car c'est en-dessous de la vitesse de la marche d'un adulte en bonne santé ;

- à cette intensité, pour perdre 10 kg de poids de corps, cela risque d'être très long. En effet :

$$\frac{\text{10000 grammes de poids de corps à perdre}}{\text{6 grammes de perdus avec l'exercice préconisé}} = 1666,4$$

soit le nombre de périodes de 30 minutes qu'il faut pour perdre les 10 kg de poids de corps. Si l'on reprend les 2 fois 30 min par semaine cela donne 833 semaines divisé par 52 semaines/an = 16 ans d'exercice physique.

En résumé, activité physique très faible, alimentation catastrophique et musculation à contre-courant. Il est évident que personne ne peut perdre de poids ainsi. Certaines études arrivent même à démontrer (et c'est absurde) que le sport fait prendre de la masse grasse.

"Bref, ils ont cru nous faire perdre du poids".

Le véritable problème réside dans le message de masse diffusé. Quel travail de titan pour les professionnels pour rattraper cette mascarade !

Avec cette manière de faire perdre du poids, il est évident que le monde médical non éclairé par la pratique et la lecture d'articles scientifiques récents risque de rebondir avec des slogans ou des articles (cf. la clinique Mayo) s'intitulant "le sport ne fait pas maigrir".

Pourtant, la population sportive ne fait pas partie de la population la plus grasse. Alors où se trouve la réalité ?

Une première erreur due à la science incomplète

La démonstration par un tableau prouvant qu'il existe une zone/intensité spéciale pour consommer la "graisse" appelée Fatzone ou, pour certains, Lipoxmax (Fatmax), est séduisante mais nous induit en erreur. Sur le terrain c'est peu convaincant et pourtant, nous n'en avons pas fini.

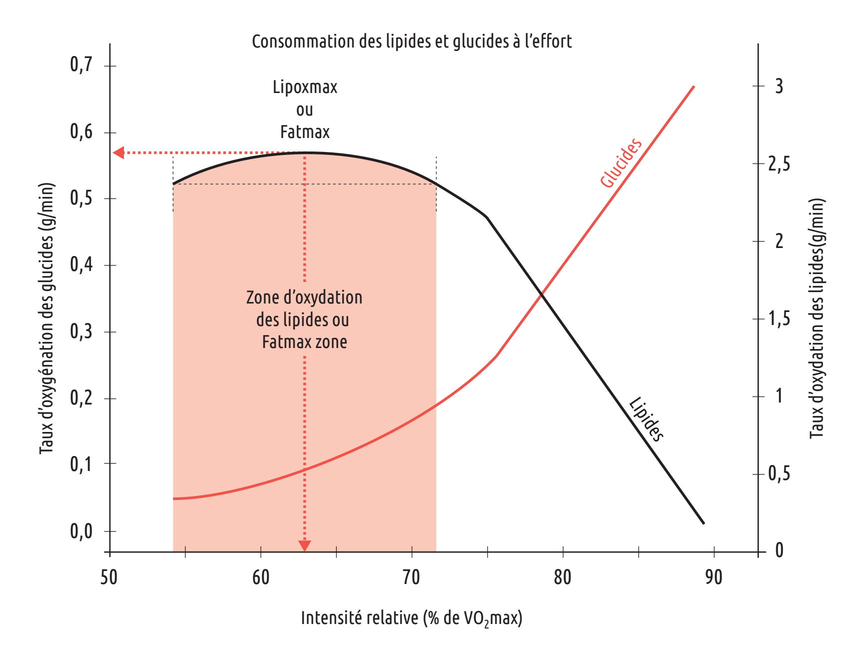


Figure 1 : Concept de la relation croisée entre glucides et lipides ("crossover" concept de Brooks et Mercier (16)).

Ce graphique (figure 1) démontre qu'à haute intensité (proche de $\dot{V}O_2$max), le muscle utilise de préférence l'énergie des glucides à celle des lipides. Conclusion hâtive pour beaucoup : il est nécessaire de s'entraîner à des intensités plus faibles pour utiliser les graisses. De nombreuses publications ont étayé ce même graphique comme celui de Achten et coll. (2004) proposé ci-après. Il montre un "lipoxmax" à 64 % du $\dot{V}O_2$max (figure 2).

Et à nouveau, nous étions repartis pour une valeur concrète et enseignable dans les formations : en analysant la courbe (où nous avons ajouté une zone de confiance dans la valeur de 8 % de part et d'autre de la valeur maximale et correspondant à une zone où les valeurs sont peu différentes les unes des autres), nous pouvions ainsi penser que de 55 % à 72 %, la différence dans le taux d'oxydation des graisses était faible.

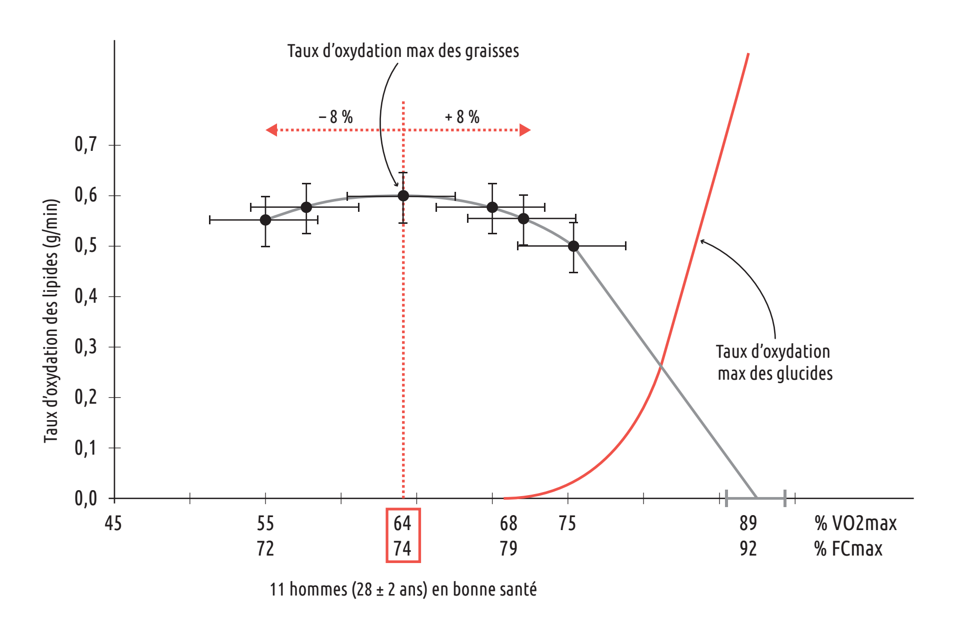


Figure 2 : Taux d'oxydation des lipides (g/min) en fonction de l'intensité (exprimée en % de $\dot{V}O_2$max et % de FCmax)

En octobre 2009, Carey (78) publie un autre document en expliquant que ce fameux lipoxmax est de 54,2 % de $\dot{V}O_2$max avec une bonne zone de confiance entre 60,2 et 80 % de la FCmax. Il faut savoir que la zone d'oxydation maximale des lipides est dépendante du niveau de condition physique, de la spécialité sportive, du sexe, du niveau de maturité, de votre stock de lipides, du repas pris avant l'exercice, et plus récemment de votre profil de personnalité (les traits de caractère)… si bien qu'**il peut s'étaler selon les études entre 25 à 85 % de $\dot{V}O_2$max** !

Faisons un petit calcul à partir de ces données pour voir ce que cela donne sur le terrain.
Imaginons une personne de 70 kg et considérons la dépense énergétique de repos fixée à 3,5 ml d'O_2/min/kg, qu'on appelle également le MET ou équivalent métabolique (1 MET = 3,5 ml d'O_2/min/kg). Cette personne fait un test de terrain progressif et maximal classique à l'issue duquel on

obtient un $\dot{V}O_2$max 50 ml d'O_2/min/kg qui est somme toute relativement bon. Cette valeur maximale obtenue à l'issue d'un test de terrain correspond à la valeur brute. Il nous faut la valeur nette avant d'aller plus loin. C'est simplement le $\dot{V}O_2$max auquel on soustrait le $\dot{V}O_2$ de repos : 50 – 3,5 = 46,5 ml/min/kg. Ce qui fait un débit énergétique maximal de 46,5/3,5 = 13 fois le métabolisme de repos, ou 13 MET. Une simple règle de trois permet de trouver les correspondances données par le tableau ci-après. Il nous montre la dépense en kcal/min pour chacune des intensités d'exercice. Il nous montre également que, en première approximation, il faudrait que le sujet fasse 34 minutes d'activité à 25 % de son $\dot{V}O_2$max, à 3,4 km/h, pour dépenser autant d'énergie que pendant 10 minutes à 85 % de son $\dot{V}O_2$max, à 11,5 km/h. Bien entendu, il faudra apporter certains petits ajustements (correctifs) pour avoir une valeur plus proche de la réalité selon la personne avec laquelle on fait ces calculs. En effet, ce tableau n'est valable que pour cet individu mais le principe peut être appliqué à tous. Ainsi, on déduira que de s'activer 10 min à 11,5 km/h est équivalent à 34 min à 3,4 km/h.

MET	$\dot{V}O_2$max (%)	$\dot{V}O_2$max (ml/min/kg)	VMA (km/h)	kcal/min	Coef.	Temps en min
13,3	100%	46,5	13,5	16		
12,6	95%	44,2	12,8	15		
12,0	90%	41,9	12,2	15		
11,3	85%	39,5	11,5	14	1,00	10
10,6	80%	37,2	10,8	13	1,06	10
10,0	75%	34,9	10,1	12	1,13	11
9,3	70%	32,6	9,5	11	1,21	12
8,6	65%	30,2	8,8	11	1,31	13
8,0	60%	27,9	8,1	10	1,42	14
7,3	55%	25,6	7,4	9	1,55	15
6,6	50%	23,3	6,8	8	1,70	17
6,0	45%	20,9	6,1	7	1,89	18
5,3	40%	18,6	5,4	7	2,13	21
4,6	35%	16,3	4,7	6	2,43	24
4,0	30%	14,0	4,0	5	2,83	28
3,3	25%	11,6	3,4	4	3,40	34
2,7	20%	9,3	2,7	3		
2,0	15%	7,0	2,0	2		
1,3	10%	4,6	1,3	2		
1,0	8%	3,5	1,0	1		

Le raisonnement reste incomplet lorsque les courbes démontrent un ratio entre les glucides et les lipides. Oui, l'oxydation des lipides baisse par rapport à celle des glucides en fonction de l'intensité, mais **le débit des 2 carburants est augmenté. La quantité de lipides utilisée à l'effort intense reste importante.** De plus, la consommation de glucides étant importante également, l'alimentation aura pour intérêt principal la reconstitution des stocks de glycogène, cela évitera de cumuler des réserves en oxydant moins les lipides.

Une deuxième erreur due à la science incomplète

Le deuxième point qui a la vie dure concerne le temps nécessaire à l'utilisation des lipides. Toujours en partant d'une étude et en l'interprétant mal, nous obtenons des discours à contre-courant du terrain.

Quelques explications :
L'information comprise est qu'il ne sert à rien de faire de l'exercice moins de 40 minutes puisque cela n'aurait pas d'influence sur l'objectif souhaité : **la perte des bourrelets disgracieux, voire plus.**

Comment est-il possible d'affirmer cela ? Des études pour le prouver ? Comment justifier que certains programmes fonctionnent sans respecter l'adage ?

L'erreur viendrait d'anciennes études qui sont soit lues trop rapidement, soit incomplètes, soit mal interprétées, soit concernant un groupe particulier dont les résultats ne sont pas forcément généralisables. Bien des études sont effectuées sur des non-sportifs, l'utilisation énergétique de leurs corps est mal adaptée à la pratique sportive. Au bout de quelques séances, le corps s'adapte et cela change les données que nous pourrions observer.

Les vieilles études sont souvent reprises dans les livres modernes. On se plaît à remonter les mêmes schémas, avec les mêmes conclusions,

sûrement par simplicité. Aussi existe-t-il une étude de 1934 qui est toujours citée pour démontrer que la consommation de graisse est importante au bout de 40 minutes.

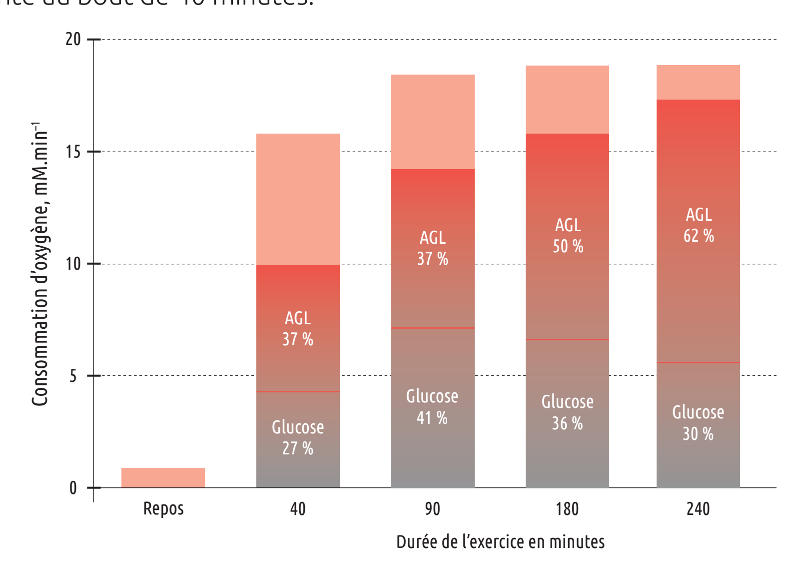


Figure 3 : Edwards et coll. (1934). L'oxydation des glucides baisse pendant que celle des lipides augmente. Conclusion interprétée : c'est à partir de 40 min que l'oxydation des lipides commence.

En reprenant l'étude d'origine et non la version des livres, nous découvrons d'autres aspects qui ne sont jamais évoqués.

Pour argumenter, nous sommes obligés de nous immerger dans le domaine de la physiologie de l'exercice, la science qui s'intéresse au fonctionnement du corps durant nos activités physiques.

Afin de mobiliser les graisses dans le corps (ou lipomobilisation), il faut envoyer des messages aux cellules qui stockent celles-ci. Trois systèmes principaux en sont capables :

- **Le pancréas** : il gère le taux de sucre du sang et relâche 4 hormones, retenons que l'insuline force la pénétration du "sucre" dans les cellules, il est utilisé ou stocké) et que le glucagon stimule la mobilisation du tissu graisseux.

- **Les glandes surrénales :** elles relâchent de très nombreuses hormones ; nous nous intéresserons aux catécholamines (adrénaline et noradrénaline). Bien entendu, le rôle que nous retiendrons ici sera la mobilisation du tissu graisseux.
- **Le cœur :** ce n'est pas qu'une pompe, c'est aussi un organe endocrine (qui relâche des hormones). Détail dans la partie **"Ce qu'on devrait nous dire…"**

L'exercice physique stimule ces 3 organes qui ont un rôle commun sur le tissu graisseux.

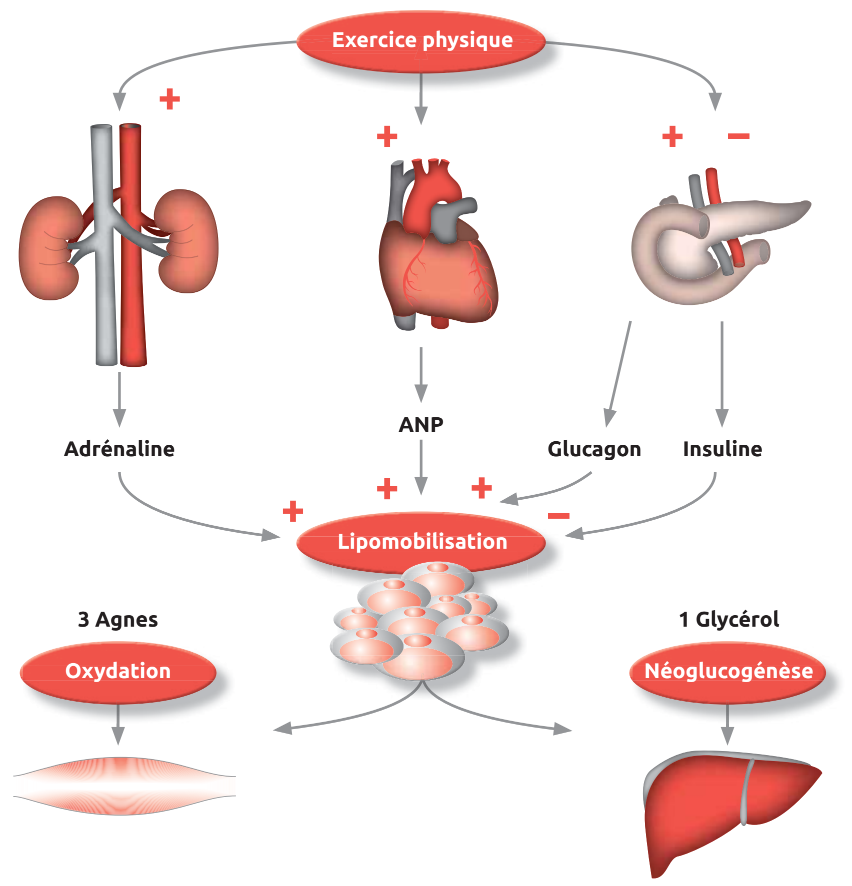


Figure 4 : Influence des 3 grandes fonctions principales hyperglycémiantes sur le tissu adipeux.

Avec une compilation importante d'études sur l'être Humain et non sur l'animal, voici les conclusions actuelles :

- Dès le début de l'exercice, les études montrent une ***consommation instantanée*** de la graisse circulant dans le sang.
- ***La mobilisation des réserves*** de graisse se fait ***très vite***, moins de 15 minutes.
- La fin de l'exercice ne montre pas la fin de la mobilisation des graisses… C'est même l'inverse, ***ce phénomène dure encore des heures***.
- Les graisses rentrent dans le muscle mais ne sont parfois pas consommées entièrement, ce dernier ne prend que ce qui l'intéresse.
- Une fois l'exercice terminé, le corps utilise les graisses qui ont été relâchées dans le sang pour refaire les stocks d'énergie. C'est bien pour cette raison qu'il ne faut pas manger après l'effort lorsque la perte de poids est l'objectif recherché. Attendre 1 à 2 heures est une bonne idée…
- ***Durant les 2 premières heures d'exercices, il n'y a pas de grandes variations d'utilisation de l'énergie en faveur des graisses.*** Il faut dépasser ces 2 premières heures pour les voir se manifester. Comme tout le monde ne pratique pas d'activité physique de plus de 2 heures, il faut oublier cet aspect.
- ***L'organisme fait tout ce qu'il faut pour utiliser de préférence les graisses car c'est son principal carburant et le plus abondant*** ; ainsi le niveau d'entraînement, l'âge, le sexe et bien d'autres paramètres modifient les chiffres que nous pouvons lire dans les études.

Il n'existe à ce jour aucun argument pour dire que 30 minutes d'exercices n'utilisent pas les graisses. À intensité égale, il est évident que 40 minutes consomment plus que 30 minutes, mais l'argument est logique par défaut. 120 min consomment plus que 40 min…

La bonne durée n'existe vraiment pas : seul le cumul d'exercices est intéressant, 2 x 20 minutes ou une fois 40 minutes donnent le même résultat. Par semaine, il faut atteindre au moins 150 minutes pour perdre du poids avec une intensité modérée selon les dernières recommandations

de l'ACSM. Mais l'on peut pousser encore plus loin le raisonnement : ce cumul de 150 minutes peut être réalisé par différentes intensités d'activités comme nous l'avons évoqué avec le tableau de correspondance entre MET, $\dot{V}O_2max$, vitesse de course...

Cependant, il est possible de le réviser à la baisse si l'on en croit plusieurs publications récentes (cf. partie "Brûlage des graisses").

Une troisième erreur due à la science incomplète

Si vous tapez les mots clés suivants dans votre moteur de recherche préféré, "le sport fait-il maigrir ?", vous allez être surpris de lire dans de nombreux articles, avec démonstrations pseudo-scientifiques et conclusions sans appel, que le sport ne fait pas maigrir.
Dans un premier temps, parlons-nous de "sport" ? Le sport a des règles, relatives à un objectif de compétition. Nous préférerons parler d'activité physique qui a, elle, des objectifs orientés vers la santé.
En second, "maigrir", est-ce descendre le chiffre de la balance ou est-ce obtenir une silhouette agréable dans le miroir ? Lorsque les motivations de la population sont analysées, il en ressort que nous parlons bel et bien du deuxième aspect en majorité.
C'est donc le pourcentage de masse grasse qui est visée lors d'un amaigrissement, il est même parfois demandé un gain de masse musculaire, qu'elle soit pour la région fessière (demande féminine) ou la région supérieure du tronc et des bras (demande masculine). Les mots employés sont "tonicité" ou "raffermissement". Ces deux termes sont mal utilisés, mais l'idée est simple : obtenir moins de masse grasse sous-cutanée et des formes représentant un corps plus athlétique (en fonction de la définition très personnelle que nous en avons).

Nous ne traiterons ici que la réponse à la question initiale.

Sans vous imposer la démonstration ci-dessous, nous pouvons d'entrée dire que OUI, l'activité physique fait maigrir.

Pourquoi lisons-nous le contraire ? Quels sont les raisonnements des personnes qui affirment le contraire ?

Que nous disent réellement les articles scientifiques sur le sujet ?

Les raisonnements démontrant que l'activité physique ne fait pas maigrir s'appuient soit sur du raisonnement "mathématique simpliste", soit sur des études cliniques parfois mal conçues (mauvais protocole), mal pensées (étude orientée vers un résultat pré-déterminé) ou mal comprises (mauvaise interprétation des résultats). La lecture fine de ces dernières dans les protocoles et résultats permet de mieux comprendre le biaisement de l'information.

Le raisonnement "mathématique simpliste" :
Un kilo de lipide égale 9 000 kilocalories (30 barres sucrées ou presque 2 pots de 800 grammes de pâte à tartiner aux noisettes).
Sachant qu'une activité physique modérée chez le débutant peut engendrer une dépense énergétique de 300 kcal (5 kcal/min), perdre 1 kg demande 30h de pratique cumulée.
Pour une personne qui pratique 3 fois 1 heure par semaine, nous estimons, avec ce raisonnement, à 10 semaines le temps nécessaire à la perte souhaitée. Pour perdre 10 kilos, le calcul est décourageant.

En quoi est-ce faux ?

Eh bien, la vie ne peut pas toujours se comparer à un fonctionnement de machine normée.
Lorsque vous arrêtez votre activité, le corps lui, n'en a pas terminé avec la dépense énergétique. La consommation d'énergie doit être pensée de façon globale : l'exercice et les conséquences de l'exercice. Sachez que lorsque vous irez prendre votre douche, que vous rentrerez exécuter vos activités professionnelles ou personnelles, votre corps sera encore au stade de réparation multiple avec une augmentation de sa dépense énergétique. Ainsi, les études sont claires : votre dépense énergétique est bien supérieure dans votre journée avec un exercice physique que sans. Ajoutez environ 150 kcal par séance, cela ramène maintenant à 20h au lieu de 30h pour ce même kilogramme de graisse à perdre (un peu moins de

7 semaines au lieu de 10 semaines). La première à le démontrer est l'équipe de Bouchard dès les années 80. Plus récemment, Knab et coll. (43) ont même mesuré ces effets dans une chambre calorimétrique pour affiner les mesures. Mais, pour l'instant, ils n'ont exploré que l'exercice continu d'intensité modérée.

Qu'oublie le raisonnement mathématique ?

Vous allez progresser, votre condition physique va s'améliorer, vous allez augmenter l'intensité en fonction de votre aptitude. Vous ne dépenserez plus 300 kcal mais 400 kcal (parfois bien plus), les études démontrent que vous pouvez tripler la dépense. Restons sur du raisonnable, vos progrès vous permettent de consommer 500 kcal par séance.
La séance + les "réparations" du corps donnent 500 kcal + 150 kcal (estimation très pessimiste, la réalité est supérieure) = 650 kcal par séance.
Votre kilogramme de graisse part maintenant en 14h, donc environ un mois d'exercice. Et voilà comment réconcilier exercice physique et perte de graisse.

Conseils post-effort

L'exercice physique stimule des hormones intéressantes pour l'utilisation des graisses et l'erreur classique est d'empêcher le rôle de ces hormones de fonctionner en prenant une collation post-effort. Manger une banane, une barre énergétique dans l'idée de refaire le plein d'énergie... Pourquoi ? L'objectif était justement de "vider" les réserves d'énergie. Pourquoi manger une barre d'énergie que vous n'auriez pas ingérée si vous n'aviez pas fait d'exercice physique ?
Dans une logique de perte de poids, il est demandé de ne pas manger au moins dans heure qui suit l'effort physique (sauf problème particulier). En revanche, buvez... de l'eau.
N'augmentez pas vos apports journaliers alimentaires. Les études ne mentionnant pas cet aspect se font un malin plaisir à apporter de mauvaises conclusions. Ici se situe la limite de certains travaux constatant sans appel que "l'activité physique n'a pas engendré de perte de poids".

Les bonnes questions à se poser sont :

- De quelle activité physique s'agit-il ?
- Quelle durée ?
- Quelle intensité ?
- Les apports alimentaires ont-ils été surveillés ?
- A-t-il été demandé aux personnes de ne pas se jeter sur la nourriture dans l'heure qui a suivi l'exercice physique ?

Pour simplifier, des entités sérieuses pourvoient des rapports avec des recommandations internationales importantes sur l'exercice et la perte de poids. Elles mentionnent :

- au moins 150 minutes (2,5 heures) cumulées d'exercice modéré par semaine ;
- les meilleurs résultats sont pour des quantités de 200 à 300 minutes (3,3 à 5 heures d'activité totalisée sur la semaine), toujours pour des exercices modérés ;
- n'augmentez pas vos apports alimentaires.

Mais bien que ces recommandations soient sérieuses, elles ne veulent pas encore inclure le travail intermittent ou "interval-training" (IT) bien plus pertinent pour la perte de poids comme nous le verrons plus loin (surtout chez le sportif).

Nous pensons que la crainte se situe au niveau d'une mauvaise utilisation de l'IT. Il ne faut pas oublier que la progression dans l'intensité doit être respectée, une faiblesse cardiaque est toujours possible, une blessure peut arriver par un entraînement mal géré.
Depuis longtemps, certaines études ont comparé le travail d'intensité faible à modérée, voire intense. Par exemple, Grediagin et coll. (32) ont comparé deux entraînements réalisés pendant 12 semaines à 50 et 80 % du $\dot{V}O_2$max de façon isocalorique, c'est-à-dire que chaque séance dans les 2 groupes entraînait une dépense équivalente de 300 kcal (figure 5). À la fin des 12 semaines, le groupe à 50 % avait perdu du poids sur la balance (MCT), l'autre non.

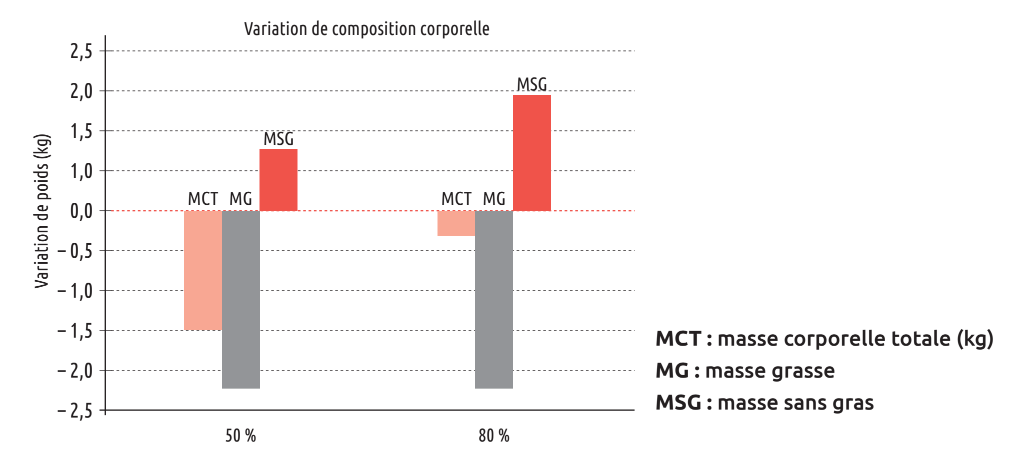


Figure 5 : Variation de la composition corporelle chez des femmes en surcharge pondérale à 2 intensités différentes dépensant la même quantité d'énergie (300 kcal).

Mais en comparant leurs compositions corporelles, on s'aperçoit que les deux groupes ont perdu la même quantité de graisse (MG) ! Pourquoi le groupe à 80 % n'a pas perdu de poids ? La seule chose qui explique l'effet observé est que le groupe entraîné à 80 % a vu sa masse musculaire (MSG) augmenter dans des proportions quasi similaires à celles de la diminution de graisse.

La conclusion logique serait que l'intensité n'a pas d'incidence sur la perte de graisse, seule la durée de l'exercice est importante. Cependant, grâce à l'intensité plus élevée, il a été possible de solliciter les fibres de type II. Ainsi, l'intensité joue un rôle supplémentaire évoqué plus loin qui a intéressé les chercheurs spécialistes de l'obésité, notamment en relation avec l'incidence de l'hérédité (8-10, 39).

Cette constatation est importante car beaucoup de personnes s'imaginent qu'en faisant de la restriction alimentaire, elles vont maigrir plus facilement... On pourrait leur dire : c'est vrai... mais ce sera la masse musculaire qui sera la première affectée et non la graisse. Plus la restriction est importante et plus la masse musculaire diminue (49). Cela est fondamental dans le contexte d'une pratique compétitive car on ne peut imaginer se priver

du moteur du mouvement, mais ça l'est tout autant pour les non-compétiteurs car on touche ici directement l'un des principaux responsables de la dépense énergétique au repos sur 24 h : le muscle. Il est démontré depuis très longtemps que cette dépense d'énergie est reliée de façon linéaire à la masse musculaire.

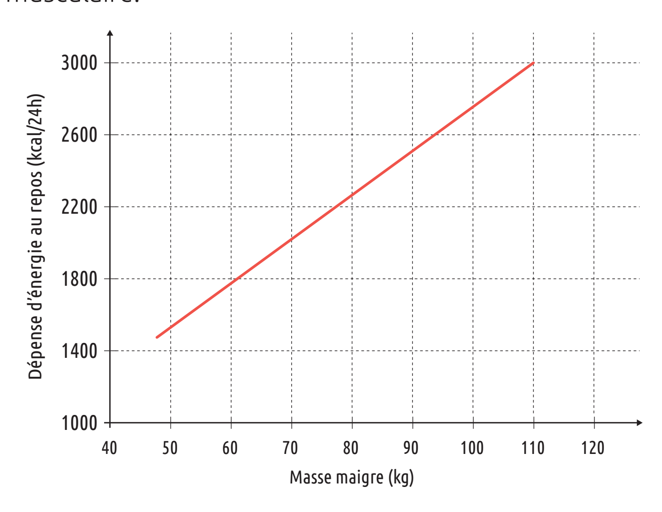


Figure 6 : Relation masse maigre et dépense d'énergie au repos (79).

L'une des meilleures stratégies pour perdre du poids est donc de préserver sa masse musculaire. Et l'un des résultats les plus importants sur ce sujet que l'on y arrive si l'on ne perd pas plus de 0,5 kg par semaine. On limite ainsi les effets négatifs sur les productions hormonales, les perturbations métaboliques, les dérèglements énergétiques (56). Les différences interindividuelles et notamment celles liées au sexe en termes d'impact sur le tissu adipeux et son métabolisme sont importantes et à prendre en considération dans toute mise en place d'un programme visant une perte de poids (5, 33, 38, 40, 44, 67).

Les dernières avancées dans ce domaine de l'individualisation touchent les aspects inflammatoires (24), génétiques, et une piste très prometteuse : les aspects cognitifs (7, 19, 47, 76, 77). En effet, les traits de personnalité dominants d'une personne pourraient expliquer une partie des échecs de

la perte et/ou de la prise de poids sur le moyen et long terme (26, 48, 51, 61, 62, 68, 69). Les données sont un peu trop parcellaires pour en tirer des recommandations solides, mais c'est à notre avis un domaine où l'on va réussir à découvrir des méthodes ou des approches qui vont améliorer l'efficacité de nos programmes. Nous en testons plusieurs à l'heure actuelle sur différents publics avec des résultats plus qu'encourageants.

Ce qu'on devrait nous dire…

Il va falloir reprendre les explications à l'origine afin d'appliquer des méthodes plus fiables…

À commencer par la cellule spécialisée dans le stockage et la mobilisation des graisses.

Ou stockons-nous la graisse ?

Ce que nous appelons communément la "graisse" représente le tissu adipeux blanc (qui est un tissu conjonctif spécialisé) et brun (en quantité très faible mais existant contrairement à la croyance, comme cela a été démontré dans une publication de 2009) qui se trouve directement sous la peau, entre les viscères, dans le muscle… Nous avons des lipides dans tout le corps.

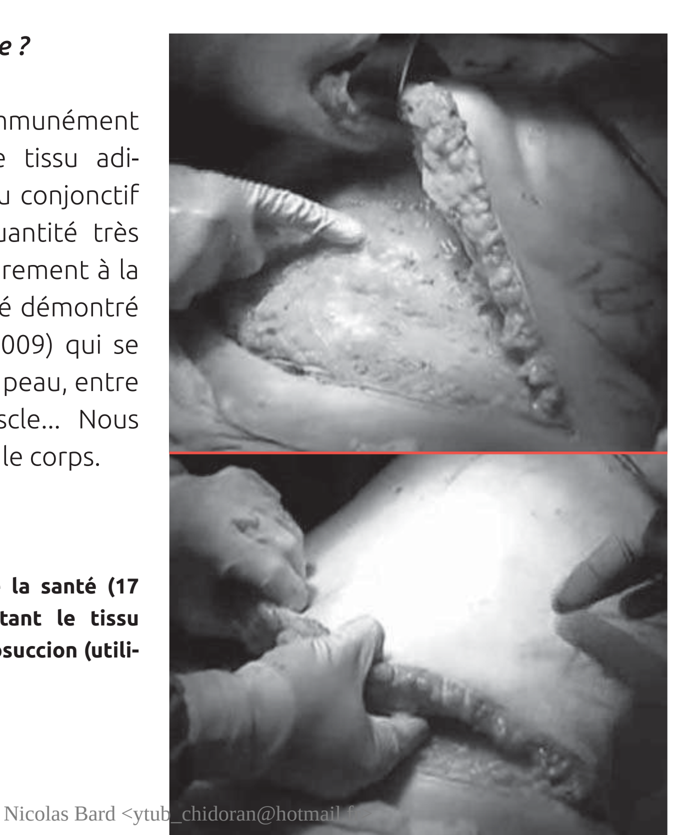
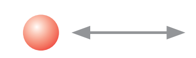


Figure 7 :
Photos issues du Magazine de la santé (17 Juin Média/France5) représentant le tissu adipeux d'une femme après liposuccion (utilisées avec autorisation).

La cellule spécialisée dans le stockage de l'énergie se nomme la cellule adipeuse ou adipocyte. Chaque individu en possède entre 20 et 30 milliards. Elles sont présentes à 90% dans le tissu adipeux. La taille de la cellule peut être multiplié par 20 (diamètre) et atteindre 100 micromètres au plus. Elle est donc capable d'hypertrophie mais également d'hyperplasie (augmentation en nombre). Elle contient les tryacylglycérols (TG), improprement appelés les triglycérides ou triacylglycérides. Cette molécule, présente uniquement à l'état de stockage, est un assemblage de 3 acides gras et d'un glycérol qui se lient pour former le TG. 95% du volume de l'adipocyte peut être de l'énergie stockée.

La taille (diamètre x 20 à l'échelle)



Énergie stockée :

- 1 g de tissu adipeux = 6 - 7 kcal ;
- 1 kg de tissu adipeux environ (7000 kcal).
- Exemple : homme 80 kg, 20 % de graisse = 16 kg de tissu adipeux et 16 x 7000kcal = 112000 kcal.

En comparaison :

- 1 g de glycogène (qui nécessite 2,7 g d'eau) = 4 kcal ;
- 1 kg muscle = 15 à 35 g de glycogène selon le niveau d'entraînement ou le type de muscle (soit 60 à 140 kcal) ;
- 20 kg de masse musculaire = 300 à 700 g de glycogène (soit 1200 à 2800 kcal).

Les tissus adipeux

Une différence notable entre le tissu blanc et le tissu brun réside à la fois dans leur présence dans le corps et surtout dans leur fonction.

1 • Le tissu brun

Caractéristiques :

- utilisé comme source de chaleur ;
- bien présent chez l'humain en petite quantité, les recherches actuelles sont orientées vers la stimulation de ce dernier car il est directement consommateur de sa propre énergie afin de produire de la chaleur. La protéine capable de cet exploit se nomme la thermogénine (UCP1, Uncoupling Protein 1) ; elle dissipe l'énergie de l'oxydation sous forme de chaleur. Il est aisé de comprendre que les animaux qui hibernent ou vivent dans des milieux hostiles (froid intense) en sont bien plus pourvus. Le jeûne prononcé ou les régimes hypocaloriques de longue durée permettent de stimuler ce dernier et favorisent la fonte des "couches résistantes". Il est richement vascularisé et innervé.

Localisation :

- surtout dans la région interscapulaire ;
- autour des gros vaisseaux (aisselles, cou) ;
- autour des reins et du cœur.

2 • Le tissu blanc

Caractéristiques :

- utilisé comme réserve énergétique et comme soutien et protection mécanique ;
- adipocytes tassés les uns contre les autres et groupés en petits lobules, visibles à l'œil nu, séparés par de fines cloisons conjonctives contenant des fibroblastes, des macrophages, des mastocytes et des fibrilles de collagène ;

- l'adipocyte est séparé des autres par des fibres de réticuline (collagène de type 3) ;
- contient de nombreux capillaires sanguins ;
- des fibres nerveuses amyéliniques représentant des fibres sympathiques noradrénergiques.

Localisation :
- directement en sous-cutané ;
- prédominant sur la nuque et les épaules chez l'homme ;
- prédominant sur la poitrine, les hanches, les cuisses et les fesses chez la femme ;
- les régions profondes ;
- les orbites, les paumes et les faces palmaires des doigts, les plantes et les faces plantaires des orteils.

Les femmes et les hommes, identiques ?

Un adipocyte est assez complexe ; au niveau de sa surface, il possède de nombreux récepteurs. Nous nous intéresserons uniquement à ceux qui se nomment les récepteurs adrénergiques (de types α et β). La régulation de la lipolyse est sous l'influence du système nerveux sympathique (celui qui énerve, rend plus "agressif". Une étude assez récente mentionne que la volonté de perdre du poids est justement une des clés du succès).

Les récepteurs sont donc sensibles à l'insuline et aux catécholamines (adrénaline et noradrénaline, hormones et messagers) que l'on va libérer durant des efforts importants. Le dopage à l'épinéphrine (adrénaline) est connu pour "sécher". Ce n'est pas un hasard car les récepteurs α ont un effet antilipolytique (néfaste pour la perte de graisse) et les récepteurs β ont un effet lipolytique (excellent pour la perte de graisse).

Le tissu abdominal est particulièrement riche en β3 (voir schémas ci-après), ce n'est pas pour rien qu'en cas de surcharge pondéral, celui-ci fond assez rapidement à l'exercice. Ils sont un peu moins sensibles que

les β1 et β2 aux catécholamines. En cas de petit stress, il n'y a pas d'effet sur la graisse du ventre, mais un stress telle l'anxiété génère du cortisol qui accentue l'effet.

β1 = niveau cardiaque et en sous-cutané. Réponse aux catécholamines.

β2 = bronche et en sous-cutané. Réponse aux corticoïdes et catécholamines.

β3 = niveau cardiaque et en sous-cutané (le ventre en contient beaucoup).

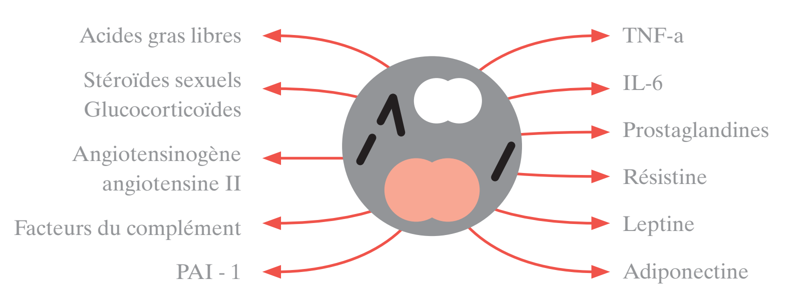
α1 = niveau viscéral.

α2 = niveau viscéral et surtout le bas du corps (hanches/cuisses). Ils entraînent aussi une baisse de production de chaleur.

α2 = 2 fois plus nombreux chez les femmes.

Les différences entre les 2 sexes vont de pair avec la répartition des récepteurs. Chez l'homme, 21 % du tissu adipeux est intra-abdominal versus 8 % chez la femme. Chez cette dernière, le reste est sous-cutané et en particulier fémoral (de plus, riche en α2). Les adipocytes sont plus sensibles aux hormones sexuelles féminines, c'est la graisse pour la reproduction. Attention à la prise de poids rapide et importante, avec l'hypertrophie des adipocytes : ce sont les récepteurs α qui augmentent.

Enfin, le tissu adipeux hypertrophié devient un organe endocrine important, la communication entre les cellules entraîne un effet pro-inflammatoire !



Substances produites par le tissu adipeux ; l'adipocyte : une cellule endocrine.

Nutrition de base

La pyramide alimentaire "made in France" (directement inspirée du PNNS - Programme national nutrition santé) propose des étages pour illustrer pédagogiquement les recommandations en quantité que l'on peut consommer par jour.

<table>
<tr><th colspan="2">Les repères de consommation offerts à la population sont les suivants</th></tr>
<tr><th>Types d'aliments</th><th>Quantité</th></tr>
<tr><td>Fruits et légumes</td><td>Au moins 5 par jour</td></tr>
<tr><td colspan="2">Notre avis :
Bien que les recommandations soient extrapolées de l'étude SUVIMAX, nous ne pouvons que conseiller de privilégier cette source alimentaire. Dans certains pays, cette partie constitue la base de la pyramide.</td></tr>
<tr><td>Pains, céréales, pomme de terre et légumes secs</td><td>À chaque repas et selon l'appétit</td></tr>
<tr><td colspan="2">• Les céréales et leurs dérivés (blé, avoine, orge, pain, pâtes, riz, semoule, orge, seigle, quinoa, etc.).
• Les pommes de terre (chips, purée et frites ne doivent pas être considérées comme des féculents).
• Les légumineuses : lentilles, haricots, pois chiches, fèves, flageolets, etc.
Notre avis :
ATTENTION : ils ne font pas grossir SI et seulement Si vous les choisissez en version complète bio (pas de pain blanc).
• Ils apportent vitamines, fibres et minéraux (les légumineuses apportent vitamine B, fer, magnésium, zinc...).
• Ils sont un allié minceur si vous n'en abusez pas car constitués de glucides complexes qui évitent fringales et grignotages.
• Féculent complet, nous insistons.
• Pomme de terre avec la pelure (car fibres qui préviennent la constipation, contrôlent la glycémie et le cholestérol, maintiennent une bonne flore intestinale).
• Pas de pommes frites, sautés ou avec beaucoup d'huile.
• Pas de sauce sucrée ou grasse.
• Mangez le moins d'aliments transformés.</td></tr>
<tr><td>Lait et produits laitiers (yaourts, fromages)</td><td>3 par jour</td></tr>
<tr><td colspan="2">Notre avis :
Avec les débats autour du lait, le responsable du plus grand centre de nutrition du monde (HARVARD) conseille d'en limiter la consommation. Si l'intérêt unique du lait et de trouver du calcium, tout diététicien peut vous aider à compenser ce manque.</td></tr>
</table>

Viandes et volailles, produits de la pêche et œufs	1 à 2 fois par jour

Notre avis
La viande rouge 2 à 3 fois par semaine. Pour les personnes sujettes à l'anémie, consultez votre spécialiste, il existe tellement d'aliments riches en fer (baies de goji, spiruline, fèves de cacao et bien d'autres nutriments plus classiques).

Matières grasses ajoutées	Limiter la consommation

Notre avis
Juste pour information, SURTOUT dans le cadre des sports à catégories de poids qui font la chasse aux matières grasses, si en abuser ne semble pas très stratégique, les stopper est bien pire.
Le pays qui consomme le moins de matière grasse est aussi celui abritant le plus d'obèses. Ils ont le plus petit ratio en % de graisse dans l'assiette. Les instances des USA spécialisés dans la nutrition se rendent compte que le sucre (sucre de table ou saccharose) est bien plus ravageur.
Les graisses sont nécessaires au fonctionnement du métabolisme des lipides. En simple, il faut des lipides pour consommer les lipides.

Produits sucrés	Limiter la consommation

Notre avis
Toutes les substances contenant un sucre rajouté sont particulièrement à limiter voire à arrêter complètement. Les glucides sont dans les féculents, les fruits, les légumes, les viandes... Presque partout.
Pourquoi avoir besoin d'un aliment au goût sucré ?
Méfiance dans l'alimentation, les industriels ont tendance à en rajouter avec une facilité déconcertante. Des tranches de jambon découpées devant vous n'ont pas la même valeur que sous cellophane : nous n'avons encore jamais vu de jambon prédécoupé sous cellophane sans glucose, dextrose (c'est pareil) ou sirop de fructose rajouté. Boire sucré est contreproductif si la perte de poids est la priorité.

Boissons	De l'eau à volonté

Notre avis
Attention, à volonté mais prenez garde à l'hyponatrémie qui engendre la mort (hypertension dans la boîte crânienne). La surconsommation est pour ainsi dire toujours néfaste, même d'eau. Récemment le docteur Margaret McCartney du British Medical Journal alertait encore sur les recommandations de 1,2 l d'eau par jour.
L'hyponatrémie provoque des mouvements d'eau du secteur extracellulaire vers l'intracellulaire pour égaliser des pressions osmotiques. C'est un manque de sodium dans le plasma qui engendre cette conséquence. Plusieurs raisons sont possibles. Dans le cas concerné, nous parlons d'hyperhydratation avec de l'eau trop pure (sport de longue durée).
Variez les eaux, qu'elles soient riches en minéraux. L'eau du robinet, la plus proche de l'eau pure, est à consommer avec modération.

Sel	Limiter la consommation

Notre avis

Pourquoi en rajouter ? Les aliments en contiennent déjà beaucoup. Sur le site de l'ANSES (anciennement AFSSA), les résultats de l'étude INCA 2 démontrent que la baisse de la consommation de sel est sur la bonne voie, mais que les Français en consomment encore trop. Certains dépassent les 12 g par jour. Trop de sel est néfaste pour la tension artérielle (donc mauvais pour les artères), aggrave la fuite du calcium et donc accélère l'ostéoporose. Le pain, les céréales, les plats cuisinés, les potages en sachet, la charcuterie et les fromages contiennent déjà beaucoup de sel, parfois 80 %. L'OMS aimerait que la population soit à moins de 5 grammes par jour.

Mobilisation des graisses

L'adipocyte blanc assure

- la **lipogenèse** (synthèse des lipides) principalement stimulée par l'insuline ;
- le **stockage** (la plus importante forme d'énergie pour lutter contre le jeûne, les efforts physiques…) ;
- la **lipolyse** (libération des lipides à ne pas confondre avec la consommation des lipides qui se nomme la béta-oxydation) principalement stimulée par les catécholamines.

Nous nous intéressons davantage bien entendu à la lipolyse ou libération des graisses par l'adipocyte. Dans la cellule se trouvent deux lipases (enzyme pour libérer les lipides) attendant d'être activées. Il s'agit de la lipase hormono-sensible (LHS) et de la lipase des monoglycérides (MGL). Elles seront activées par les catécholamines (adrénaline et noradrénaline) ainsi qu'une autre hormone puissante : l'ANP (peptide atrial natriurétique). Ce peptide[20] a été découvert il y a peu de temps. Il est libéré par le cœur : plus celui-ci accélère, plus l'ANP est secrété.
Et oui ! Le cœur est un organe endocrine. Les formations sportives n'en parlent que rarement, voire jamais.

20 / Un peptide est une chaîne d'acides aminés reliés entre eux par des liaisons dites "peptidiques".

- 1981 : Bold et collaborateur découvrent des effets diurétiques des hormones secrétées par le cœur (qui favorisent la sécrétion d'urine) et natriurétiques (qui permettent l'excrétion du sodium ou Na) ;
- 1984 : Kangawa identifie la ANP ;
- 1988 et 1990, 2 autres hormones sont identifiées, la BNC (B-type ou brain natriuretic peptide) et la CNP (C-type natriurétique).

L'ANP a pour origine les cellules cardiaques auriculaires. Elles sont sécrétées lorsque la tension des parois des atria[21] et la volémie (volume sanguin total) augmentent. Des hormones peuvent également stimuler la sécrétion comme les catécholamines, l'arginine, l'endothéline, la vasopressine.

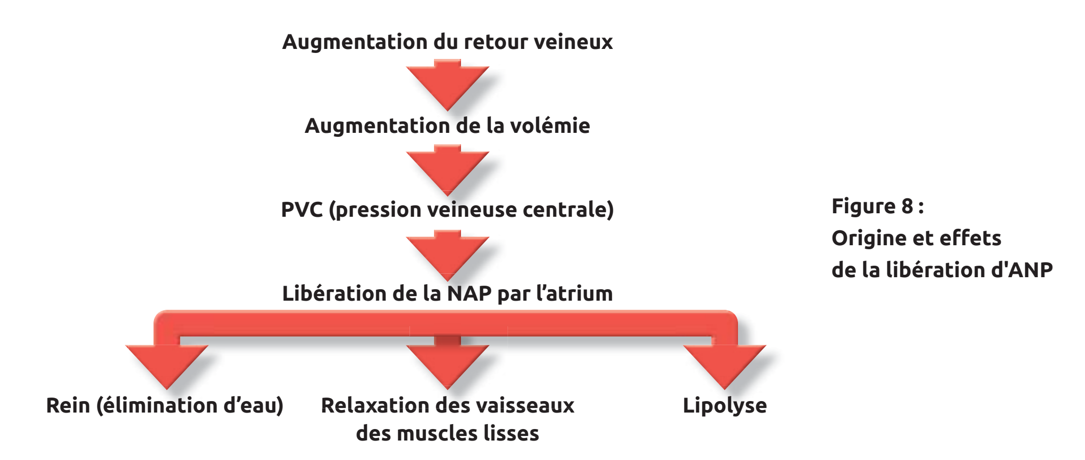


Figure 8 : Origine et effets de la libération d'ANP

Outre ces enzymes, il y a interaction entre les différentes sources d'énergie dans le muscle. Ainsi, durant l'exercice, la glycolyse est un puissant inhibiteur de la lipolyse des graisses intramusculaires et/ou des graisses ayant traversé la paroi de la fibre musculaire (via les très nombreuses formes de protéines de liaison lipidiques ou "lipid binding proteins" comme la FAD-CD36) puis la membrane mitochondriale (via différentes formes de carnitine dont les carnitine palmitoyltransferase ou CPT par exemple) (41).

21 / L'atrium (pluriel : atria) est le nom donné à l'oreillette (cavité supérieure du cœur) dans la "nouvelle" nomenclature en vigueur au niveau international, Terminologia Anatomica (Edition Thieme, 1998).

Brûlage des graisses

La fabrication de ces deux types de transporteurs est stimulée par l'exercice dit aérobie (36, 63). Mais récemment, la démonstration a été faite que l'exercice de très haute intensité et bref était capable de stimuler ces mêmes transporteurs et la production de nouvelles mitochondries, remettant en question des décennies de croyances quant aux formes d'exercice les plus adaptées pour brûler les graisses.

En effet, depuis longtemps, on pense et on enseigne l'idée selon laquelle l'une des clés de la programmation de l'entraînement est le choix judicieux de la forme, la fréquence, le volume et l'intensité de l'exercice, avec comme résultante la possibilité d'obtenir la réponse adaptative spécifique désirée (34). Une autre idée largement répandue est qu'il existe une relation proportionnelle entre le volume d'exercice et le niveau d'adaptation (25) avec néanmoins un seuil de volume au-delà duquel il n'y aurait plus d'adaptation possible. Tel est le cas des adaptations de type aérobie qui ne pourraient avoir lieu qu'en-dessous du $\dot{V}O_2$max.

Pourtant, en 1982, Dudley et coll. ont montré chez le rat que l'exercice bref de haute intensité entraîne les mêmes adaptations que l'exercice sous-maximal prolongé et de faible intensité en termes d'activation des enzymes mitochondriales (22). Étude complètement passée inaperçue.

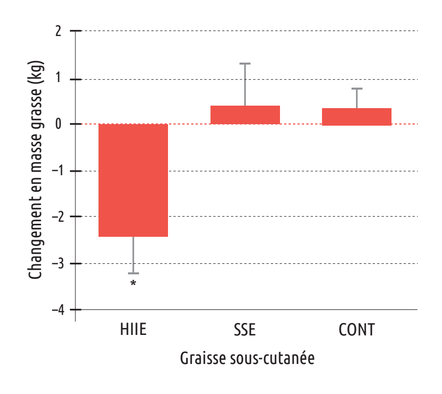
Depuis, les choses sont différentes. Nous avons évoqué les adaptations très surprenantes obtenues chez l'homme avec un exercice bref à très haute intensité (plus de 200% du $\dot{V}O_2$max) sur le métabolisme musculaire dans le chapitre consacré à l'endurance (cf. chapitre 3 p. 174 et suivantes) ; résultats qui corroborent ceux obtenus chez l'animal (3, 4, 17, 28, 30, 37). Ils remettent en question notre vision de la spécificité de l'entraînement et du métabolisme musculaire tels qu'ils ont été imaginés à ce jour, à savoir que :

- il existe 3 "filières" bien distinctes ;
- chacune liée à des formes de travail bien spécifiques en termes de volume, intensité, durée, récupération, fréquence… ;
- il convient de respecter ces spécificités pour obtenir les réponses adaptatives souhaitées (par exemple, augmentation de la capillarité, augmentation du nombre de mitochondries, augmentation du stock de glycogène,

augmentation de la concentration et de l'activité des enzymes mitochondriales).

Cela nous fait complètement oublier que ces "chemins" métaboliques sont issus d'études toujours plus détaillées, de mécanismes de plus en plus spécifiques, analysant souvent de façon isolée les différentes parties du muscle. Cependant, une prise de recul est nécessaire car démonstration est faite aujourd'hui que ces compartiments n'existent que pour faciliter leur compréhension à titre individuel, qu'une interaction permanente existe entre ce que l'on a appelé les filières anaérobie alactique, anaérobie lactique et aérobie, et que la charge d'entraînement doit être considérée dans sa totalité (stress), pas uniquement par ces paramètres descriptifs (volume, intensité, durée,...) (20, 27). (Cf. le principe d'équivalence p. 186).

Ainsi, un exercice typiquement anaérobie alactique, comme un test de Wingate (pédaler au maximum durant 30 s), par l'intensité du stress qu'il provoque sur l'organisme, facilite le transport des graisses et du cholestérol, stimule la multiplication des mitochondries, l'augmentation de l'activité des enzymes contenues dans ces mitochondries... celles-là même qui vont permettre de brûler les graisses, en particulier les longues chaînes d'acides gras (37, 50, 53, 66). Ceci explique les résultats obtenus récemment chez des femmes (72) illustrés ci-après (Fig. 9).



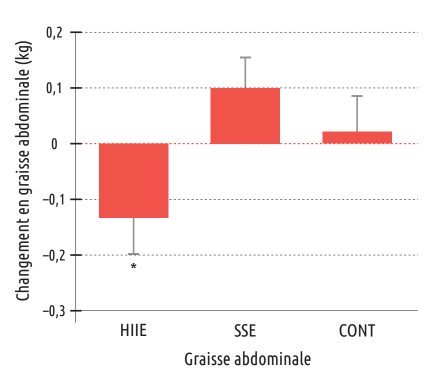


Figure 9 : Perte de masse grasse sous-cutanée et abdominale en fonction de la forme de sollicitations après 15 semaines d'entraînement (HIIE : entraînement intermittent de haute intensité [8 s de sprint à fond + 12 s de pédalage à faible intensité pendant 20 min], SSE : entraînement continu à intensité constante [40 min à 60 % du $\dot{V}O_2$max], CONT : groupe contrôle). D'après Trapp et coll.

Même s'il reste encore du chemin avant d'élucider la raison d'une telle efficacité (activation des catécholamines plus importante (14, 15), EPOC* plus élevée grâce au découpage de la séance (1, 42, 45), impact sur certaines hormones (54, 55) dont la leptin (72), hypothétique régulation de la faim par stimulation via l'hypophyse (60)...), le HIIT/SIT s'avère une forme de sollicitation très efficace pour la perte de poids, notamment la graisse abdominale (11-13, 35, 52, 72-75), pour peu que l'on sache doser les séances (12, 13, 29, 46).

Le mythe Tabata

Depuis quelques années, les étudiants ou sportifs nous parlent de la méthode Tabata dans toutes les versions possibles. Il faut rappeler que le protocole publié est strict, il ne s'agit pas d'un travail pour la perte de poids et la démonstration ne s'est pas faite dans ce sens. Dans le protocole de 6 semaines, à raison de 5 jours d'entraînement par semaine, le premier était réservé à la pratique de 30 minutes de vélo à 70 % de $\dot{V}O_2$max ; "seuls" les 4 autres jours étaient réservés au travail d'*interval*. Même Tabata lui-même conserve une part de travail continu (c'était surtout pour des raisons de calcul de durée). L'intermittent est à 170% de $\dot{V}O_2$max, il est donc impossible de reproduire cette intensité avec des squats, des burpees, des élastiques... Le 20/10 est un *interval* connu, le nommé Tabata est dévalorisant pour les "anciens" entraîneurs qui faisaient la même chose (à moins que Tabata ait inventé cet forme de travail ? Non...).

Pas facile de faire du "vrai Tabata" ; bien que nous respections son travail, qu'il en récupère toute une gloire au détriment des nombreux entraîneurs qui, depuis un siècle, pratiquent et ont contribué au développement de l'interval-training, nous trouvons cela réducteur. Surtout qu'au final, personne ne fait du Tabata !

*** EPOC : "Excess Post-exercise Oxygen Consumption", "Excès de Consommation d'Oxygène Post-exercice".**

Nous sommes donc bien loin des recommandations relatées dans certains journaux ou magazines télévisuels. C'est même l'opposé de ce qui est préconisé par certains "spécialistes" de la perte de poids dont on attend encore les preuves scientifiques pour argumenter leurs choix. Idem pour les recommandations de l'ACSM évoquées plus haut.

Il est donc possible de construire des séances stimulant de façon équivalente le muscle en vue de maximiser la dégradation des graisses dans les muscles actifs pendant et après l'exercice. Cela nécessite de passer par un calcul associant le MET, la durée de la séance, le nombre de jours où l'exercice a été réalisé dans la semaine, l'équivalent en 0_2 utilisé par l'exercice pour transformer le tout en kcal/min et vérifier que les deux formes de travail (intermittent et continu) provoquent le même stress métabolique mettant en œuvre l'ensemble des adaptations évoquées plus haut.

Au final, ce n'est pas la durée et l'intensité de l'exercice en lui-même, mais la charge de travail dans sa globalité, qu'il convient de maîtriser pour faciliter la perte de poids.

Courir à jeun ?

Dans une prochaine édition de l'ouvrage, nous ferons le point si les études sont plus nombreuses. Notre position est que même si certains pratiquent l'exercice à jeun, dans le cadre de personnes peu entraînées, nous n'en voyons pas l'intérêt, voire nous le déconseillons (risques de malaises à l'entraînement, utilisation d'acides gras essentiels durant l'effort qui ne seront pas forcément ingérés durant le prochain repas : les personnes en perte de poids s'alimentent souvent de manière peu optimale). Pour le sportif, nous avons encore des doutes sur l'efficacité pour la perte de poids, mais moins pour des adaptations du corps à l'endurance et une meilleure gestion du glucose par les cellules. À suivre.

Bibliographie

• 1 • Almuzaini KS, Potteiger JA, and Green SB. Effects of split exercise sessions on excess postexercise oxygen consumption and resting metabolic rate. Can J Appl Physiol 23: 433-443, 1998.

• 2 • Appelhans BM, Kazlauskaite R, Karavolos K, Janssen I, Kravitz HM, Dugan S, Burns JW, Shipp-Johnson K, and Powell LH. How well does the body adiposity index capture adiposity change in midlife women?: The SWAN fat patterning study. Am J Hum Biol 24: 866-869, 2012.

• 3 • Bartlett JD, Hwa Joo C, Jeong TS, Louhelainen J, Cochran AJ, Gibala MJ, Gregson W, Close GL, Drust B, and Morton JP. Matched work high-intensity interval and continuous running induce similar increases in PGC-1alpha mRNA, AMPK, p38, and p53 phosphorylation in human skeletal muscle. J Appl Physiol 112: 1135-1143, 2012.

• 4 • Bartlett JD, Louhelainen J, Iqbal Z, Cochran AJ, Gibala MJ, Gregson W, Close GL, Drust B, and Morton JP. Reduced carbohydrate availability enhances exercise-induced p53 signalling in human skeletal muscle: implications for mitochondrial biogenesis. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol, 2013.

• 5 • Berg A, Frey I, Baumstark MW, Halle M, and Keul J. Physical Activity and Lipoprotein Lipid Disorders. Sports Medicine 17: 6-21, 1994.

• 6 • Bergman RN, Stefanovski D, Buchanan TA, Sumner AE, Reynolds JC, Sebring NG, Xiang AH, and Watanabe RM. A better index of body adiposity. Obesity (Silver Spring, Md) 19: 1083-1089, 2011.

• 7 • Biddle SJ and Fox KR. Motivation for physical activity and weight management. Int J Obes Relat Metab Disord 22 Suppl 2: S39-47, 1998.

• 8 • Bouchard C. Individual differences in the response to regular exercise. Int J Obes Relat Metab Disord 19 Suppl 4: S5-8, 1995.

• 9 • Bouchard C, Depres JP, and Tremblay A. Exercise and obesity. Obesity research 1: 133-147, 1993.

• 10 • Bouchard C, Tremblay A, Nadeau A, Despres JP, Theriault G, Boulay MR, Lortie G, Leblanc C, and Fournier G. Genetic effect in resting and exercise metabolic rates. Metabolism 38: 364-370, 1989.

• 11 • Boudou P, Sobngwi E, Mauvais-Jarvis F, Vexiau P, and Gautier JF. Absence of exercise-induced variations in adiponectin levels despite decreased abdominal adiposity and improved insulin sensitivity in type 2 diabetic men. Eur J Endocrinol 149: 421-424, 2003.

• 12 • Boutcher SH. High-intensity intermittent exercise and fat loss. Journal of obesity 2011: 868305, 2011.

• 13 • Boutcher SH and Dunn SL. Factors that may impede the weight loss response to exercise-based interventions. Obesity reviews : an official journal of the International Association for the Study of Obesity 10: 671-680, 2009.

• 14 • Bracken RM and Brooks S. Plasma catecholamine and nephrine responses following 7 weeks of sprint cycle training. Amino acids 38: 1351-1359, 2010.

• 15 • Bracken RM, Linnane DM, and Brooks S. Plasma catecholamine and nephrine responses to brief intermittent maximal intensity exercise. Amino acids 36: 209-217, 2009.

• 16 • Brooks GA and Mercier J. Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the "crossover" concept. Journal of Applied Physiology 76: 2253-2261, 1994.

• 17 • Burgomaster KA, Howarth KR, Phillips SM, Rakobowchuk M, Macdonald MJ, McGee SL, and Gibala MJ. Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. J Physiol 586: 151-160, 2008.

• 18 • Burton RF. The body adiposity index is not the best hip-height index of adiposity. Br J Nutr 108: 2100-2101, 2012.

• 19 • Carnell S, Gibson C, Benson L, Ochner CN, and Geliebter A. Neuroimaging and obesity: current knowledge and future directions. Obesity reviews : an official journal of the International Association for the Study of Obesity 13: 43-56, 2012.

• 20 • Coyle EF. Very intense exercise-training is extremely potent and time efficient: a reminder. J Appl Physiol 98: 1983-1984, 2005.

• 21 • de Lima JG, Nobrega LH, and de Souza AB. Body adiposity index indicates only total adiposity, not risk. Obesity (Silver Spring, Md) 20: 1140, 2012.

• 22 • Dudley GA, Abraham WM, and Terjung RL. Influence of exercise intensity and duration on biochemical adaptations in skeletal muscle. J Appl Physiol 53: 844-850, 1982.

• 23 • Esco MR. The accuracy of the Body Adiposity Index for predicting body fat percentage in collegiate female athletes. J Strength Cond Res, 2012.

• 24 • Farb MG, Bigornia S, Mott M, Tanriverdi K, Morin KM, Freedman JE, Joseph L, Hess DT, Apovian CM, Vita JA, and Gokce N. Reduced adipose tissue inflammation represents an intermediate cardiometabolic phenotype in obesity. Journal of the American College of Cardiology 58: 232-237, 2011.

• 25 • Fitts RH, Booth FW, Winder WW, and Holloszy JO. Skeletal muscle respiratory capacity, endurance, and glycogen utilization. Am J Physiol 228: 1029-1033, 1975.

• 26 • Fortier MS, Duda JL, Guerin E, and Teixeira PJ. Promoting physical activity: development and testing of self-determination theory-based interventions. The international journal of behavioral nutrition and physical activity 9: 20, 2012.

• 27 • Gibala MJ, Little JP, Macdonald MJ, and Hawley JA. Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval-training in health and disease. J Physiol 590: 1077-1084, 2012.

• 28 • Gibala MJ, Little JP, van Essen M, Wilkin GP, Burgomaster KA, Safdar A, Raha S, and Tarnopolsky MA. Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. J Physiol 575: 901-911, 2006.

• 29 • Gibala MJ and McGee SL. Metabolic Adaptations to Short-term High-Intensity Interval-training: A Little Pain for a Lot of Gain? Exercise and sport sciences reviews 36: 58-63 10.1097/JES.1090b1013e318168ec318161f, 2008.

• 30 • Gibala MJ, McGee SL, Garnham AP, Howlett KF, Snow RJ, and Hargreaves M. Brief intense interval exercise activates AMPK and p38 MAPK signaling and increases the expression of PGC-1alpha in human skeletal muscle. J Appl Physiol 106: 929-934, 2009.

• 31 • Gibson CD, Atalayer D, Flancbaum L, and Geliebter A. Body adiposity index (BAI) correlates with BMI and body fat pre- and post-bariatric surgery but is not an adequate substitute for BMI in severely obese women. International journal of body composition research 10: 9-14, 2012.

• 32 • Grediagin A, Cody M, Rupp J, Benardot D, and Shern R. Exercise intensity does not effect body composition change in untrained, moderately overfat women. J Am Diet Assoc 95: 661-665, 1995.

• 33 • Hagobian TA and Braun B. Physical Activity and Hormonal Regulation of Appetite: Sex Differences and Weight Control. Exercise and sport sciences reviews 38: 25-30 10.1097/JES.1090b1013e3181c1095cd1098, 2010.

• 34 • Hawley JA. Adaptations of skeletal muscle to prolonged, intense endurance training. Clinical and experimental pharmacology & physiology 29: 218-222, 2002.

• 35 • Heydari M, Freund J, and Boutcher SH. The effect of high-intensity intermittent exercise on body composition of overweight young males. Journal of obesity 2012: 480467, 2012.

• 36 • Holloway GP, Bezaire V, Heigenhauser GJ, Tandon NN, Glatz JF, Luiken JJ, Bonen A, and Spriet LL. Mitochondrial long chain fatty acid oxidation, fatty acid translocase/CD36 content and carnitine palmitoyltransferase I activity in human skeletal muscle during aerobic exercise. J Physiol 571: 201-210, 2006.

• 37 • Hood MS, Little JP, Tarnopolsky MA, Myslik F, and Gibala MJ. Low-volume interval-training improves muscle oxidative capacity in sedentary adults. Med Sci Sports Exerc 43: 1849-1856, 2011.

• 38 • Hulver MW and Houmard JA. Plasma Leptin and Exercise: Recent Findings. Sports Medicine 33: 473-482, 2003.

• 39 • Hunter GR, Weinsier RL, Bamman MM, and Larson DE. A role for high intensity exercise on energy balance and weight control. Int J Obes Relat Metab Disord 22: 489-493, 1998.

• 40 • Jacobs KA, Krauss RM, Fattor JA, Horning MA, Friedlander AL, Bauer TA, Hagobian TA, Wolfel EE, and Brooks GA. Endurance training has little effect on active muscle free fatty acid, lipoprotein cholesterol, or triglyceride net balances. Am J Physiol Endocrinol Metab 291: E656-665, 2006.

• 41 • Jeppesen J and Kiens B. Regulation and limitations to fatty acid oxidation during exercise. J Physiol 590: 1059-1068, 2012.

• 42 • Kaminsky LA, Padjen S, and LaHam-Saeger J. Effect of split exercise sessions on excess post-exercise oxygen consumption. Br J Sports Med 24: 95-98, 1990.

• 43 • Knab AM, Shanely RA, Corbin KD, Jin F, Sha W, and Nieman DC. A 45-minute vigorous exercise bout increases metabolic rate for 14 hours. Med Sci Sports Exerc 43: 1643-1648, 2011.

• 44 • Koutsari C, Snozek CL, and Jensen MD. Plasma NEFA storage in adipose tissue in the postprandial state: sex-related and regional differences. Diabetologia 51: 2041-2048, 2008.

• 45 • LaForgia J, Withers RT, and Gore CJ. Effects of exercise intensity and duration on the excess post-exercise oxygen consumption. J Sports Sci 24: 1247-1264, 2006.

• 46 • Laursen PB and Jenkins DG. The Scientific Basis for High-Intensity Interval-training: Optimising Training Programmes and Maximising Performance in Highly Trained Endurance Athletes. Sports Medicine 32: 53-73, 2002.

• 47 • Le DSN, Pannacciulli N, Chen K, Del Parigi A, Salbe AD, Reiman EM, and Krakoff J. Less activation of the left dorsolateral prefrontal cortex in response to a meal: a feature of obesity. The American Journal of Clinical Nutrition 84: 725-731, 2006.

• 48 • Lee LL, Arthur A, and Avis M. Using self-efficacy theory to develop interventions that help older people overcome psychological barriers to physical activity: a discussion paper. International journal of nursing studies 45: 1690-1699, 2008.

• 49 • Leibel RL, Rosenbaum M, and Hirsch J. Changes in energy expenditure resulting from altered body weight. N Engl J Med 332: 621-628, 1995.

• 50 • Little JP, Safdar A, Wilkin GP, Tarnopolsky MA, and Gibala MJ. A practical model of low-volume high-intensity interval-training induces mitochondrial biogenesis in human skeletal muscle: potential mechanisms. J Physiol 588: 1011-1022, 2010.

• 51 • Mata J, Silva MN, Vieira PN, Carraca EV, Andrade AM, Coutinho SR, Sardinha LB, and Teixeira PJ. Motivational "spill-over" during weight control: increased self-determination and exercise intrinsic motivation predict eating self-regulation. Health psychology : official journal of the Division of Health Psychology, American Psychological Association 28: 709-716, 2009.

• 52 • Mourier A, Gautier JF, De Kerviler E, Bigard AX, Villette JM, Garnier JP, Duvallet A, Guezennec CY, and Cathelineau G. Mobilization of visceral adipose tissue related to the improvement in insulin sensitivity in response to physical training in NIDDM. Effects of branched-chain amino acid supplements. Diabetes Care 20: 385-391, 1997.

• 53 • Musa DI, Adeniran SA, Dikko AU, and Sayers SP. The Effect of a High-Intensity Interval-training Program on High-Density Lipoprotein Cholesterol in Young Men. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 587-592 510.1519/JSC.1510b1013e318198fd318128, 2009.

• 54 • Nevill ME, Boobis LH, Brooks S, and Williams C. Effect of training on muscle metabolism during treadmill sprinting. J Appl Physiol 67: 2376-2382, 1989.

• 55 • Nevill ME, Holmyard DJ, Hall GM, Allsop P, van Oosterhout A, Burrin JM, and Nevill AM. Growth hormone responses to treadmill sprinting in sprint- and endurance-trained athletes. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 72: 460-467, 1996.

• 56 • Paillard T. [Optimal strategies to loose bodyweight for weight-class sports]. Appl Physiol Nutr Metab 31: 684-692, 2006.

• 57 • Parikh R, Mohan V, and Joshi S. Should waist circumference be replaced by index of central obesity (ICO) in definition of metabolic syndrome? Diabetes/metabolism research and reviews 28: 3-5, 2012.

• 58 • Parikh RM, Joshi SR, Menon PS, and Shah NS. Index of central obesity - A novel parameter. Med Hypotheses 68: 1272-1275, 2007.

• 59 • Parikh RM, Joshi SR, and Pandia K. Index of central obesity is better than waist circumference in defining metabolic syndrome. Metabolic syndrome and related disorders 7: 525-527, 2009.

• 60 • Rivest S and Richard D. Involvement of corticotropin-releasing factor in the anorexia induced by exercise. Brain research bulletin 25: 169-172, 1990.

• 61 • Silva MN, Markland D, Minderico CS, Vieira PN, Castro MM, Coutinho SR, Santos TC, Matos MG, Sardinha LB, and Teixeira PJ. A randomized controlled trial to evaluate self-determination theory for exercise adherence and weight control: rationale and intervention description. BMC Public Health 8: 234, 2008.

• 62 • Silva MN, Vieira PN, Coutinho SR, Minderico CS, Matos MG, Sardinha LB, and Teixeira PJ. Using self-determination theory to promote physical activity and weight control: a randomized controlled trial in women. Journal of behavioral medicine 33: 110-122, 2010.

• 63 • Smith BK, Bonen A, and Holloway GP. A dual mechanism of action for skeletal muscle FAT/CD36 during exercise. Exerc Sport Sci Rev 40: 211-217, 2012.

• 64 • Suchanek P, Kralova Lesna I, Mengerova O, Mrazkova J, Lanska V, and Stavek P. Which index best correlates with body fat mass: BAI, BMI, waist or WHR? Neuro endocrinology letters 33 Suppl 2: 78-82, 2012.

• 65 • Sun G, Cahill F, Gulliver W, Yi Y, Xie Y, Bridger T, Pace D, and Zhang H. Concordance of BAI and BMI with DXA in the Newfoundland population. Obesity (Silver Spring, Md), 2012.

• 66 • Talanian JL, Galloway SD, Heigenhauser GJ, Bonen A, and Spriet LL. Two weeks of high-intensity aerobic interval-training increases the capacity for fat oxidation during exercise in women. J Appl Physiol 102: 1439-1447, 2007.

• 67 • Tchoukalova YD, Koutsari C, Votruba SB, Tchkonia T, Giorgadze N, Thomou T, Kirkland JL, and Jensen MD. Sex- and depot-dependent differences in adipogenesis in normal-weight humans. Obesity (Silver Spring, Md) 18: 1875-1880, 2010.

• 68 • Teixeira PJ, Carraca EV, Markland D, Silva MN, and Ryan RM. Exercise, physical activity, and self-determination theory: a systematic review. The international journal of behavioral nutrition and physical activity 9: 78, 2012.

• 69 • Teixeira PJ, Silva MN, Mata J, Palmeira AL, and Markland D. Motivation, self-determination, and long-term weight control. The international journal of behavioral nutrition and physical activity 9: 22, 2012.

• 70 • Tibana RA, Navalta J, Bottaro M, Vieira D, Tajra V, Silva AD, de Farias DL, Pereira GB, de Souza JC, Balsamo S, Cavaglieri CR, and Prestes J. Effects of eight weeks of resistance training on the risk factors of metabolic syndrome in overweight /obese women - "A Pilot Study". Diabetology & metabolic syndrome 5: 11, 2013.

• 71 • Tibana RA, Teixeira TG, Farias DL, Silva AD, Madrid B, Vieira A, Franz CB, Balsamo S, Souza Junior TP, and Prestes J. Relation of neck circumference and relative muscle strength and cardiovascular risk factors in sedentary women. Einstein (Sao Paulo, Brazil) 10: 329-334, 2012.

• 72 • Trapp EG, Chisholm DJ, and Boutcher SH. Metabolic response of trained and untrained women during high-intensity intermittent cycle exercise. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 293: R2370-2375, 2007.

• 73 • Trapp EG, Chisholm DJ, Freund J, and Boutcher SH. The effects of high-intensity intermittent exercise training on fat loss and fasting insulin levels of young women. International journal of obesity (2005) 32: 684-691, 2008.

• 74 • Whyte LJ, Ferguson C, Wilson J, Scott RA, and Gill JM. Effects of single bout of very high-intensity exercise on metabolic health biomarkers in overweight/obese sedentary men. Metabolism 62: 212-219, 2013.

• 75 • Whyte LJ, Gill JM, and Cathcart AJ. Effect of 2 weeks of sprint interval-training on health-related outcomes in sedentary overweight/obese men. Metabolism 59: 1421-1428, 2010.

• 76 • Willeumier K, Taylor DV, and Amen DG. Elevated body mass in National Football League players linked to cognitive impairment and decreased prefrontal cortex and temporal pole activity. Translational psychiatry 2: e68, 2012.

• 77 • Willeumier KC, Taylor DV, and Amen DG. Elevated BMI is associated with decreased blood flow in the prefrontal cortex using SPECT imaging in healthy adults. Obesity (Silver Spring, Md) 19: 1095-1097, 2011.

• 78 • Carey G Daniel, Quantifying Diffferences in the "fat burning zone and aerobic zone : implications for training. JSCR octobre 2009

• 79 • Speakman JR and Selman C. Physical activity and resting metabolic rate. Proc Nutr Soc 62: 621-634, 2003.

• 80 • Durnin J. and Wosmersley J. Body fat assessed from total density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. Brit J. Nutr 312(1): 77-97.

Références :

• 81 • La Recherche N°437 janvier 2010 p.52.

• 82 • Thèse présentée devant l'université Paul Sabatier, Toulouse III, en vue de l'obtention du doctorat de l'université Paul Sabatier. Spécialité : Pharmacologie Moléculaire et de la formation doctorale en biologie, santé et biotechnologies, Toulouse. Expression de la lipase hormono-sensible dans le testicule. Par Régis BLAISE Soutenue le 13 Décembre 1999.

5

Comment optimiser la musculation avec les bons mouvements ?

Sommaire

1 • Apports de connaissances 237

Introduction 237
La variation musculaire 238
Nomenclature d'anatomie, il faut appeler un chat un chat 244
Nos muscles sont vivants 247

2 • L'analyse fonctionnelle 254

Le tirage nuque 254
Le tirage menton 259
Le développé couché 260
Le squat 265
Le pull-over 267
Le redressement de tronc ("crunch") 269
Prévention des douleurs et action musculaire anticipée 272
Conclusion 272

3 • Les mouvements en un clin d'œil 273

Conclusion 280

Bibliographie 281

1 • Apports de connaissances

Introduction

Ce chapitre ne doit pas être une redite des multiples ouvrages, pour certains très bien construits dans le référencement des mouvements de musculation ainsi que sur l'anatomie précise. Le plus connu étant selon nous un véritable travail d'artiste. Il est surtout utile d'insister sur quelques mouvements connus en mentionnant leur intérêt dans le domaine de la préparation physique ainsi que de pointer les erreurs constatées. Pour y remédier, nous nous appuierons sur la traumatologie fréquente, les rappels anatomiques nécessaires à la compréhension et les enregistrements électromyographiques (EMG).

La notion de variation musculaire n'étant que rarement abordée, mais pourtant nécessaire à la compréhension de la performance ou pour le développement de la masse musculaire, un tableau reprenant les principaux muscles est présenté, notion capitale et pour beaucoup inconnue.

De même, les travaux utilisant l'électromyographie comme outil d'analyse de nos mouvements pour voir ce qu'il se passe à l'intérieur du corps (synergies musculaires, niveau d'activation, etc.) en plus de ce que l'on peut observer à l'extérieur (cinématique, posture, etc.) apportent un éclairage très intéressant sur la façon dont nous mobilisons notre corps durant le mouvement. Des surprises sont au rendez-vous dès lors que l'on combine ces deux approches, laissant peu de place aux suppositions concernant l'implication de tel ou tel muscle, de son niveau d'activation supérieur dans tel mouvement par rapport à tel autre, telle phase de mouvement ou telle autre. Ainsi, nous introduisons dans ce domaine un peu plus d'objectivité et sortons de celui de la subjectivité.

Nous voulons des fiches pratiques listant :
- le mouvement et sa pédagogie ;
- son intérêt ;
- les muscles moteurs ;

• la variation possible si besoin ;
• l'erreur la plus courante ;
• la traumatologie possible.

La variation musculaire

Lorsque l'on ouvre un livre d'anatomie ou que l'on assiste à un cours, nous n'observons jamais d'enseignement mentionnant cette réalité frappante : NOUS SOMMES TOUS DIFFÉRENTS MAIS FAISONS PARTIE D'UNE MÊME ESPÈCE. Nous voulons en venir à une notion que les anatomistes connaissent bien, que les praticiens en médecine savent, que les kinésithérapeutes vivent au quotidien : nous n'avons pas tous le même nombre d'os, ils ne sont pas de la même longueur (cela influence les leviers et donc la force produite) et nous n'avons pas le même nombre de muscles. Même pour un muscle commun, il peut soit être plus gros (avec des fibres surnuméraires), soit atrophié (partie manquante). Des muscles connus pour avoir 3 attaches en ont 4 ou 2. Pis encore, il existe des muscles présents à 50 %, l'absence du muscle est considérée comme normale (ou l'inverse). On retrouve d'excellents articles sur ce sujet, pour preuve que ces données sont connues de longue date (e.g. (2, 13)). Nous avons nous-mêmes pu le constater dans nos séances de dissection lors de nos premières années en STAPS à l'université de Bordeaux, seuls moments où nous avons réellement fait de l'anatomie à notre avis.

Systématiquement dans les formations, lorsque nous mentionnons cette partie de l'anatomie, pourtant le reflet de la vie et non des livres, nous avons le droit à des regards étonnés. Nos stagiaires en arrivent à demander à leurs médecins. Pour l'anecdote, un médecin avait expliqué à une stagiaire que l'absence du muscle grand droit de l'abdomen était impossible car il aurait été impossible de s'asseoir. Déconcerté par ce retour incroyable, nous avons dû "prouver" que nous avions raison. Au final, ouvrage de référence à l'appui, le doute s'installait chez la stagiaire. Par chance, son ostéopathe a confirmé nos dires... notre honneur était sauf (mieux vaut en rire). Ce qui est consternant, ce sont ces lacunes dans les enseignements dont nous sommes les premières victimes quelquefois. Nous recherchons

des solutions de terrain et nous sommes mal armés pour le comprendre. L'échec de certains programmes de musculation, notamment d'hypertrophie, peuvent simplement s'expliquer par ce facteur : il a une incidence sur le volume que peut prendre un membre à un endroit donné.

Mais les esprits carrés, cartésiens ou normalisés acceptent mal cette idée (lisez la citation que nous avons faite de S. J. Gould dans l'introduction concernant les variations et la moyenne... elle illustre parfaitement la situation page 15). Un muscle doit s'attacher ici, se terminer là et doit avoir la même fonction pour tous. La réalité est pourtant présente pour nous démontrer l'inverse. Il suffit d'ouvrir les yeux et d'observer le monde. Combien d'individus sont fantastiques dans leurs différences ? La performance de haut niveau est sans doute l'aboutissement de la supériorité de cette différence génétique. Votre corps finit par vous orienter "naturellement" vers votre sport de prédilection. Si votre croissance se stoppe à 1,65 m, votre hypothétique carrière en saut en hauteur est compromise (voire utopique). Bien que le mental puisse faire performer l'improbable, il existe une limite imposée par les lois de la physique. Le mental n'est pas magique ! Nous ne ferons pas ici un cours de génétique, mais nous donnerons juste une explication. Une population ayant évolué dans une même région de la planète finit par "appauvrir" le patrimoine génétique. Aujourd'hui, les moyens de transport offrent des mariages "impossibles" il y a encore 200 ans. Le croisement des gènes apporte une richesse, c'est ce que l'on nomme la vitalité hybride. Mais concrètement, c'est parfois prendre le meilleur de tous pour faire évoluer l'espèce.

Pour en revenir à la performance, nous obtenons une population plus grande, peut-être des muscles plus aptes à de nouveaux records. La supériorité afro-américaine ou maintenant jamaïcaine en sprint s'explique difficilement, mais qu'avons-nous scientifiquement ; le gène x de la vitesse, des parties distales plus moins massives (chevilles et mollets moins développés, c'est plus facile de les faire bouger), des membres inférieurs plus longs, des tendons parfois également plus longs et un tissu conjonctif plus raide. Un cocktail détonant qui fait trembler les chronos.

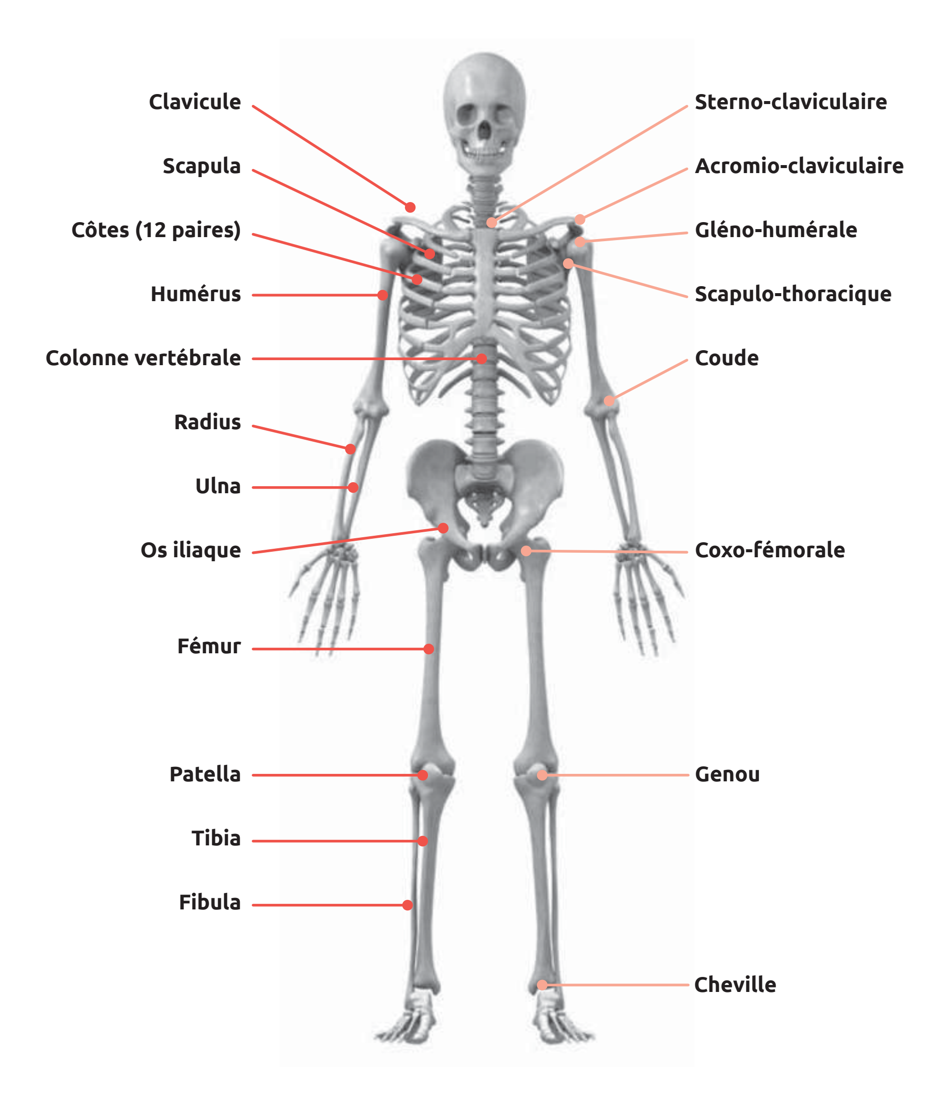


Figure 1 : Squelette humain. Ce schéma est très général mais suffit dans un premier temps pour obtenir les bases à la compréhension des mécanismes liés aux mouvements "classiques".

Le corps possède plus de 600 muscles, aucun ouvrage de référence n'est en mesure d'apporter un chiffre exact, ce qui nous semble normal vu l'impossibilité de normer les 7 milliards que nous sommes. Parfois 650 muscles, parfois 680… Nous n'avons pas tous le même nombre, c'est un fait. Le tableau ci-après est une aide importante à la compréhension de la performance. Vous visez un développement de masse musculaire, un esthétisme particulier (culturisme) ou le développement de la force sur une partie précise du corps, l'observation et la connaissance des variations musculaires ouvrent l'esprit critique et peuvent faire gagner du temps.

Tableau 1

Muscle	Insertion	Terminaison	Rôles
Trapèze	Base du crâne. Processus épineux des vertèbres cervicales et jusqu'à la 11e vertèbre thoracique.	Clavicule sur le bord supérieur, tiers latéral. Acromion. Épine de la scapula, sur son bord inférieur.	À partir de la colonne vertébrale prise comme point fixe : • élève le moignon de l'épaule et effectue une sonnette latérale, • une contraction bilatérale du faisceau supérieur provoque une extension cervicale. Adducteur de la scapula : • abaisse le moignon de l'épaule, • effectue une sonnette latérale et une adduction de la scapula.
Variation	Muscles fréquemment asymétriques. La partie descendante (partie haute) peut faire défaut (ne pas exister). L'aspect cou de taureau est tout de suite très difficile à obtenir. Des faisceaux surnuméraires (cou de taureau accentué) sont possibles vers l'avant pouvant atteindre le muscle sterno-cléido-occipito-mastoïdien.		
Deltoïde	Deltoïde antérieur ou claviculaire : sur le 1/3 latéral du bord antérieur de la clavicule. Deltoïde moyen ou acromial : sur le bord latéral de l'acromion. Deltoïde postérieur : sur l'épine de la scapula.	Tubérosité deltoidienne.	Abducteur du bras jusqu'à 90°. Antépulseur par son chef antérieur. Rétropulseur par son chef postérieur.
Variation	Absence de la partie acromiale possible (moins de largeur à l'œil) ; la partie claviculaire peut aussi faire défaut. Parfois, la partie claviculaire est indépendante (fréquent) et très frêle. Ce muscle est divisé en 3 parties de manière commune mais peut aussi se diviser en 6 parties. Des faisceaux surnuméraires sont donc possibles en provenance des bords médiaux et latéraux de la scapula, ou des fibres partant de la clavicule peuvent aller jusqu'à l'épicondyle médial de l'humérus (coude).		

Tableau 1 (suite)

Biceps brachial	Chef long : au-dessus de la glène de la scapula, tubercule supra-glénoïdien. Chef court : sommet du processus coracoïde de la scapula.	Partie supérieure du radius, sur la tubérosité bicipitale du radius.	Fléchisseur de l'avant-bras sur le bras. En cas d'inversion de son point fixe, il fléchit le bras sur l'avant-bras. Puissant supinateur de l'avant-bras.
Variation	Possibilité de deux insertions (chez 10 % des individus) provenant de la diaphyse de l'humérus. Absence possible de fusion des muscles qui semblent séparés (cela change l'esthétique et l'entraînement n'y peut rien changer). Absence possible d'un des deux chefs, et parfois, absence totale du biceps. D'autres muscles peuvent faire les mêmes mouvements que le biceps, il n'est pas indispensable.		
Triceps brachial	Long chef : partie inférieure de la glène de la scapula, sur le tubercule infra-glénoïdien. Chef latéral : face postérieure humérus moitié supérieure. Chef médial : face postérieure humérus, moitié inférieure.	Sur l'olécrane de l'ulna, par un tendon commun aux 3 chefs.	Le plus puissant extenseur de l'avant-bras. Rétropulseur par le long chef.
Variation	Il peut présenter un quatrième chef partant du processus coracoïde ou du bord latéral de la scapula ou de la capsule articulaire. Il peut également fusionner avec l'anconé (muscle au niveau du coude).		
Brachial	Face antérieure de l'humérus, moitié inférieure.	Face antérieure et supérieure de l'ulna, sur la tubérosité ulnaire.	Fléchisseur de l'avant-bras sur le bras. En cas d'inversion de son point fixe, il fléchit le bras sur l'avant-bras.
Variation	Il peut fusionner avec des muscles voisins. Son volume musculaire influence le volume du bras.		
Grand pectoral	Moitié médiale ou sternale du bord antérieur de la clavicule, face antérieure des cartilages des 6 premières côtes, et portion adjacente du sternum.	Sur la crête du tubercule majeur de l'humérus (Sillon intertuberculaire ou coulisse bicipitale).	Adducteur du bras. Rotateur médial du bras. Si le bras est le point fixe, il soulève le tronc.
Variation	Fusion possible avec le deltoïde (comme beaucoup de singes). Fusion ou pas des différentes origines. Les fameux trois faisceaux n'ont rien d'obligatoire. Il peut faire défaut.		
Grand dorsal	Processus épineux des 6 dernières vertèbres thoraciques, de toutes les vertèbres lombaires, sur la crête sacrée du sacrum et sur le tiers postérieur de la crête iliaque.	Sur la crête du tubercule mineur de l'humérus (coulisse intertuberculaire ou coulisse bicipitale).	Adducteur du bras. Rotateur médial du bras. Rétropulseur du bras. Si le bras est le point fixe, il soulève le tronc.
Variation	Il peut fusionner avec le grand rond, une partie des faisceaux peuvent se terminer sur la face dorsale de la terminaison du grand pectoral. Les origines à partir de la colonne vertébrale sont nombreuses.		

Tableau 1 (suite)

Grand droit de l'abdomen	Processus xiphoïde, cartilages des 5e, 6e et 7e côtes.	Crête et symphyse pubienne.	Abaisse les côtes et participe à l'expiration. Fléchisseur du tronc sur le bassin.
Variation	Il peut faire défaut. Certaines personnes minces qui ne voient pas du tout de formes sous la peau peuvent se poser des questions. Il peut également s'insérer plus haut, jusqu'à la deuxième côte, le manubrium sternal ou l'origine du petit pectoral. Muscles en plusieurs parties, de 2 à 6 possibles. Les côtés gauche et droit ont le même nombre de parties, mais pas forcément de mêmes longueurs. Le côté gauche s'élève davantage au-dessus du pubis que le côté droit.		
Transverse	Partie postérieure commune avec le grand dorsal (T12 à L5), crête iliaque et ligament inguinal.	Ligne blanche, crête pubienne, et les 6 derniers arcs costaux.	Détermine par sa contraction une compression des viscères qui favorise la miction, la défécation, le vomissement et l'expiration.
Variation	N'en déplaise aux spécialistes du Pilates, ce muscle peut faire défaut ou fusionner avec l'oblique interne (muscle capable de toutes les fonctions du transverse).		
Grand fessier	Partie postérieure de la crête iliaque	Face postérieure du sacrum et du coccyx. Face postérieure du fémur, sur la lèvre latérale du grand trochanter où il forme une crête, sur le tiers supérieur de la ligne âpre du fémur.	Extenseur de la hanche. Rotateur latéral de la hanche.
Variation	Des faisceaux surnuméraires sont possibles en partant du coccyx, sûrement des restes du muscle agitateur de queue (chien, chat…). Les fessiers de ses Dames ne sont donc pas tous égaux déjà à la naissance.		
Quadriceps	Droit du fémur : épine iliaque antéro-inférieure, bord supérieur de l'acétabulum. Vaste latéral : face latérale du grand trochanter et les deux tiers supérieurs de la ligne âpre du fémur. Vaste médial : lèvre médiale de la ligne âpre du fémur. Vaste intermédiaire : recouvert par le le droit fémoral. Deux tiers supérieurs de la face antérieure et latérale du fémur.	Tendon quadricipital, tendon qui se termine sur la patella d'une part, et sur le tibia de l'autre.	Fléchisseur de la hanche. Extenseur du genou.
Variation	Le droit du fémur a deux origines ; celle de l'acétabulum peut manquer. La forme des vastes peut être différente.		

Sartorius	Épine Iliaque antéro-supérieure.	Muscles de la patte d'oie, quart supérieur de la face médiale du tibia.	Fléchisseur de la hanche. Abducteur et rotateur latéral de la hanche. Fléchisseur et rotateur médial du genou.
Variation	Il peut faire défaut, sa largeur est variable.		
Gastroc-némiens	Face postérieure de chaque condyle fémoral. On distingue le chef médial et le chef latéral.	Face postérieure du calcanéum par le tendon d'Achille.	Fléchisseur du genou. Extension de la cheville (aussi appelée flexion plantaire).
Variation	Soit les 2 muscles sont séparés, soit la partie latérale peut faire défaut, soit un troisième muscle peut apparaître en partant du fémur (lèvre médiale de la ligne âpre du fémur).		

Nomenclature d'anatomie, il faut appeler un chat un chat

Les découvreurs par la dissection de ligaments ou autres portions du corps ont donné un nom de leur choix, parfois leur nom de famille, à leur découverte. L'anatomie était difficile à apprendre et peu logique. De plus, entre les nations, le même ligament portait bien des noms. Le XVIe siècle n'a pas aidé lorsque le latin a été privilégié. Des anatomistes allemands ont tenté d'uniformiser cette terminologie en 1895 en créant la Nomina Anatomica de Bâle (BNA), mais les pays francophones gardent leurs habitudes. En 1955 est publiée la Nomina Anatomica de Paris (PNA) qui sera révisée en 1960. En 1970, les livres de référence en anatomie ne le mentionnaient toujours pas (les tomes d'anatomie d'Henri Rouvière ont été les référents, mais la dixième édition n'était toujours pas à la page). En 1998, la Federative Commitee on Anatomical Terminology s'impose et donne la Terminologica Anatomica. Le latin est officiel avec une version anglaise à titre indicatif. La déclinaison en Français se fait à partir de l'origine (le tendon d'Achille devient le tendon calcanéen).

Mais que se passe t-il alors ? Pourquoi cet écart dans le vocabulaire ?

- Les ouvrages ne sont pas tous à jour.
- Les formateurs ne sont pas tous à jour.
- Conflits de générations entre les professionnels : certains parlent de rotule, d'autres de patella, certains d'omoplate, d'autres de scapula.
- Les médecins ne veulent pas toujours expliquer les changements de vocabulaire et continuent à utiliser les anciennes appellations.

Pour vous y retrouver, nous avons préparé une aide avec les tableaux suivants.

Tableau 2 : Membres inférieurs

Nouvelle nomenclature	Ancienne nomenclature
Muscles pelvi- trochanteriens	
Piriforme	Pyramidal du bassin
Obturateur interne	Obturateur interne
Obturateur externe	Obturateur externe
Jumeau supérieur	Jumeau supérieur
Jumeau inferieur	Jumeau inférieur
Carré fémoral	Carré crural
Muscles adducteurs	
Gracile	Droit interne
Long adducteur	Moyen adducteur
Court adducteur	Petit adducteur
Grand adducteur	Grand adducteur
Pectiné	Pectiné
Hanche cuisse	
Grand psoas	Grand psoas
Petit psoas	Petit psoas
Iliaque	Iliaque
Muscle quadriceps	
Quadriceps fémoral	Quadriceps crural
Droit fémoral	Droit antérieur
Vaste latéral	Vaste externe
Vaste intermédiaire	Crural
Vaste médial long (VLM)	Vaste interne vertical
Vaste médial oblique (VMO)	Vaste interne oblique
Muscle de la cheville	
Tibial antérieur	Jambier antérieur
Tibial postérieur	Jambier postérieur
Gastrocnémiens	Jumeaux
Soléaire	Soléaire
Long fibulaire	Long péronier latéral
Court fibulaire	Court péronier latéral

Tableau 3 : Membres supérieurs

Muscles vertebro-huméraux	
Grand dorsal	Grand dorsal
Grand pectoral	Grand pectoral
Muscles de la ceinture scapulaire	
Trapèze	Trapèze
Grand rhomboïde	Grand rhomboïde
Petit rhomboïde	Petit rhomboïde
Élévateur de la scapula	Angulaire de l'omoplate
Dentelé antérieur	Grand dentelé
Petit pectoral	Petit pectoral
Muscles de l'épaule	
Deltoïde	Deltoïde
Subscapulaire	Sous scapulaire
Supra-épineux	Sus épineux
Infra-épineux	Sous épineux
Petit rond	Petit rond
Grand rond	Grand rond
Coraco-brachial	Coraco-brachial
Muscles du coude	
Biceps brachial	Biceps brachial
brachial	Brachial antérieur
Triceps brachial	Triceps brachial
Brachio radial	Long supinateur
Muscles de l'avant-bras	
Supinateur	Court supinateur
Rond pronateur	Rond pronateur
Carré pronateur	Carré pronateur
Muscles du poignet	
Long extenseur radial	Premier radial
Court extenseur radial	Deuxième radial
Extenseur ulnaire du carpe	Cubital postérieur
Fléchisseur radial du carpe	Grand palmaire
Long palmaire	Petit palmaire
Fléchisseur ulnaire du carpe	Cubital antérieur

Tableau 4 : Cou et tronc

Muscle du cou	
Longissimus du cou	Transversaire du cou
Semi-épineux du cou	Semi-épineux cervical
Iliocostal du cou	Iliocostal
Splénius du cou	Splénius
Épineux du cou	Long épineux cervical
Interépineux du cou	Interépineux cervicaux
Intertransversaires du cou	Intertransversaires cervicaux
Rotateurs du cou	Rotateurs
Droit antérieur de la tête	Petit droit antérieur de la tête
Droit latéral de la tête	Petit droit latéral de la tête
Long de la tête	Grand droit antérieur de la tête
Long du cou	Long du cou
Scalène antérieur	Scalène antérieur
Scalène moyen	Scalène moyen
Sternocléidomastoïdien	Sternocléidomastoïdien
Muscles de l'abdomen	
Oblique externe de l'abdomen	Grand oblique
Oblique interne de l'abdomen	Petit oblique
Transverse de l'abdomen	Transverse
Droit de l'abdomen	Grand droit de l'abdomen
Muscles du dos	
Multifide	Transversaires épineux, faisceaux longs
Rotateurs du thorax	Rotateurs
Rotateurs des lombes	Rotateurs
Intertransversaires du thorax	Intertransversaires dorsaux
Intertransversaires des lombes	Intertransversaires lombaires
Carré des lombes	Carré des lombes

Nos muscles sont vivants

Nous venons d'évoquer les différences anatomiques interindividuelles concernant les muscles.
Il en existe une autre tout aussi importante concernant l'activité de ces

mêmes muscles que l'on sollicite dans un mouvement. Elle est mise en évidence par l'électrophysiologie.
On appelle électrophysiologie, l'analyse de l'activité électrique de nos muscles. Ces fondations ont été posées il y a bien longtemps par un italien, Luigi Galvani, même si l'on avait déjà observé dans l'ancienne Égypte que des animaux pouvaient produire de l'électricité (comme certaines anguilles ou des poissons comme la torpille ou le poisson-chat par exemple) ; ils ont même été utilisés pour faire de l'électrostimulation à des fins thérapeutiques... ou de torture.

L'électrophysiologie a été élevée au rang d'art par les physiologistes John Basmajian et Carlos de Luca dans un ouvrage mondialement connu : *"Muscles Alive : Their Functions Revealed by Electromyography"* (1). Publié en 1967, nous n'avons pu tenir entre nos mains et dévorer que la 5e édition (1985). La démonstration est faite aujourd'hui qu'un mouvement est le résultat de l'activation de nos muscles selon un pattern choisi par notre cerveau. Ce pattern ou modèle de mouvement est observé de l'extérieur par une approche cinématique mais peut l'être aussi de l'intérieur par un complément électromyographique. L'association des deux est devenue indispensable pour toute personne souhaitant comprendre comment nous bougeons. Ultimement, on complétera ces informations à l'aide d'une plate-forme de force.

Force est de constater que la forme extérieure et observable d'un mouvement est quasi similaire d'un individu à l'autre lorsqu'ils ont un même niveau d'apprentissage. Malgré cela, en apposant des capteurs sur les muscles lors de ce mouvement, on peut être surpris par le fait que telle personne va plus activer tel muscle plutôt que tel autre et que ce modèle d'activation va être différent de celui d'une autre personne. "Tous les chemins mènent à Rome", paraît-il. Le cerveau semble avoir fait de cet adage un principe de fonctionnement.
Pour observer, de façon non-invasive, ce qui se passe quand on fait tel ou tel mouvement, on place des électrodes (Figure 2 : Les deux types d'électrodes les plus souvent utilisées pour enregistrer l'activité électrique du

muscle) sur les muscles (par n'importe où bien sûr). Ce sont des capteurs sensibles à l'électricité produite par ces derniers. Ces électrodes sont comme de petits microphones avec lesquels on écoute les muscles nous parler en amplifiant le signal.
On devrait plutôt dire chuchoter ou murmurer car leur discours est de très faible intensité : il n'est que de quelques millivolts alors que votre courant domestique délivre 220 V ! Cette méthode peut devenir invasive si l'on utilise des électrodes intramusculaires (Figure 2), sortes de fils que l'on plante dans le muscle, un peu comme les aiguilles d'acupuncture, mais en beaucoup plus fins.

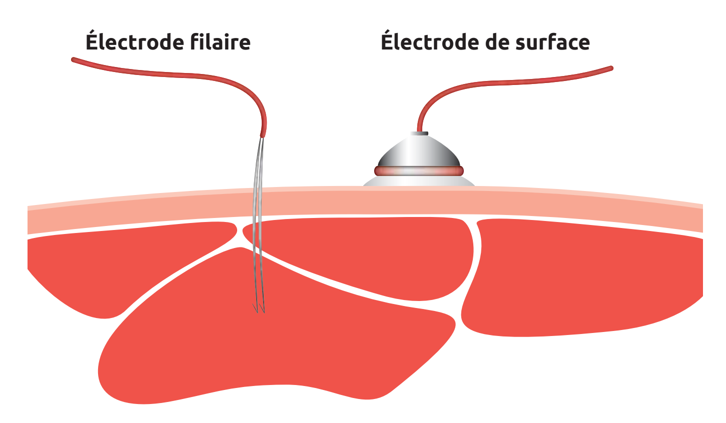


Figure 2 : Les deux types d'électrodes les plus souvent utilisées pour enregistrer l'activité électrique du muscle.

Nous passerons sur les détails de la mesure en elle-même et du traitement du signal qui s'ensuit pour n'évoquer que quelques aspects qui nous semblent importants pour l'étude des mouvements et lever les ambiguïtés concernant l'implication ou non d'un muscle dans un exercice donné.
L'illustration page suivante (Figure 3) permet de voir comment on passe du signal brut (bouffées d'activité électrique) au signal analysé avec les outils statiques, ce qu'on appelle le signal "intégré". On mesure comme pour l'index glycémique : on mesure l'aire sous la courbe que l'on a obtenue (en mathématiques, on appelle cela une "intégration").

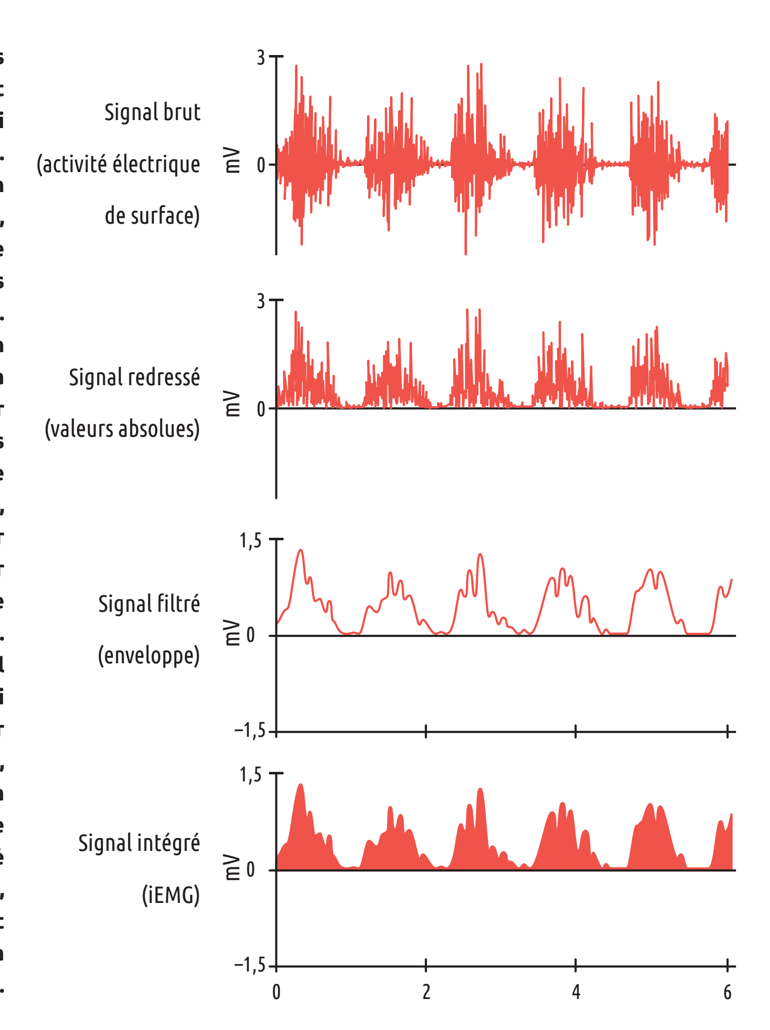


Figure 3 : Illustration des étapes dans le traitement du signal électrique recueilli au niveau musculaire. Dans un premier temps, on obtient une activité brute, une oscillation électrique entre les deux électrodes (variation de potentiel). Puis on transforme en valeur absolue, ce qui a pour effet de faire passer toutes les activités sous l'axe horizontal au-dessus de celui-ci (mathématiquement, on peut simplement élever au carré chaque valeur puisque le carré d'un nombre négatif est toujours positif). On filtre ensuite le signal pour enlever le bruit qui le parasite afin d'obtenir l'enveloppe du signal. Enfin, on calcule l'aire sous la courbe que nous venons de trouver pour avoir l'intensité de l'activité. Maintenant, les enregistrements sont prêts à être passés dans la moulinette statistique.

Lorsque l'on enregistre l'activité musculaire, on remarque d'emblée que celle-ci est différente selon le volume des muscles analysés, la position des électrodes, la phase de contraction musculaire, etc. Il existe donc beaucoup de facteurs pouvant faire varier le signal recueilli. L'interprétation s'en trouve alors très difficile et on peut conclure des choses de façon un peu trop hâtive si l'on n'y prend pas garde. De Luca a très bien illustré l'ensemble de ces facteurs pour obliger les chercheurs à être vigilants quant à la validi-

té de leurs travaux et surtout de leurs conclusions (8). La **normalisation** a pour objectif de rendre possible la comparaison entre des valeurs qui ne l'étaient pas au début. Quand on sait la petitesse du signal (quelques millivolts ou dizaine de millivolts seulement) qu'il est obligatoire d'amplifier, il est logique de penser que pour les plus gros muscles le signal sera plus fort que pour les muscles plus petits. Et c'est vrai aussi pour des muscles ayant plusieurs portions. Prenez un muscle comme le droit de l'abdomen (rectus abdominis, RA) souvent appelé "six-pack". Il est démontré que nous n'avons pas tous le même nombre de ventres des deux côtés. Qui plus est, le volume de chacun d'eux est différent entre les personnes, mais aussi chez un même individu. Il devient alors impossible de comparer les activités électriques ou électromyogrammes (EMG) de ces muscles entre les individus ou pour un même individu. L'illustration ci-après (Figure 4) montre justement cette différence de niveau d'activité entre la partie haute et la partie basse du RA lors de 4 répétitions d'un mouvement de "crunch" classique.

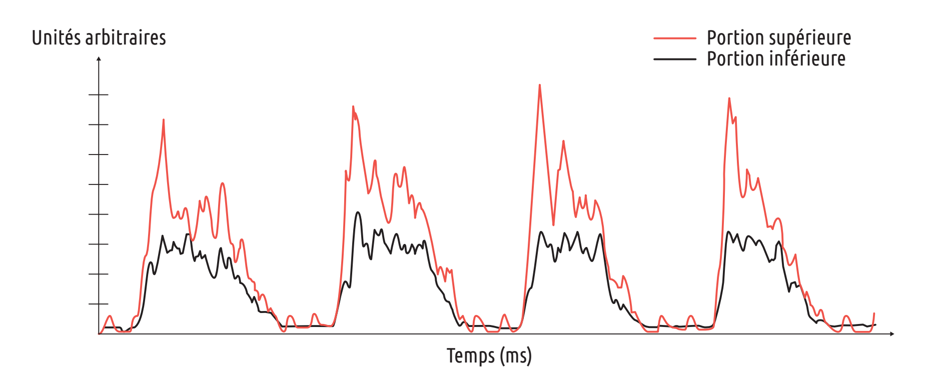


Figure 4 : Niveau d'activation de la portion supérieure et de la portion inférieure du droit de l'abdomen (rectus abdominis) enregistré lors de 4 répétitions d'un mouvement de "crunch" standard (rapprochement du sternum vers le pubis). Les valeurs sont exprimées de façon brute par rapport au logiciel d'enregistrement avec lequel elles ont été obtenues (d'après 25).

La conclusion qui s'impose est que la partie haute est plus stimulée pendant le "crunch". Donc que la partie haute est plus "forte" que la partie basse. Mais il existe des techniques dites de "normalisation". Pour norma-

liser, il faut utiliser une valeur commune aux deux portions de ce muscle. La seule que nous puissions utiliser est la contraction maximale volontaire, c'est-à-dire le 100% d'activation que l'on peut obtenir avec ces portions du RA lors d'une seule et unique contraction maximale volontaire (CMV). En transformant les valeurs brutes de la figure 4 en valeurs relatives à ce maximum, on obtient les pourcentages de la 1RM de chaque ventre musculaire, tel qu'illustré par la figure 5.

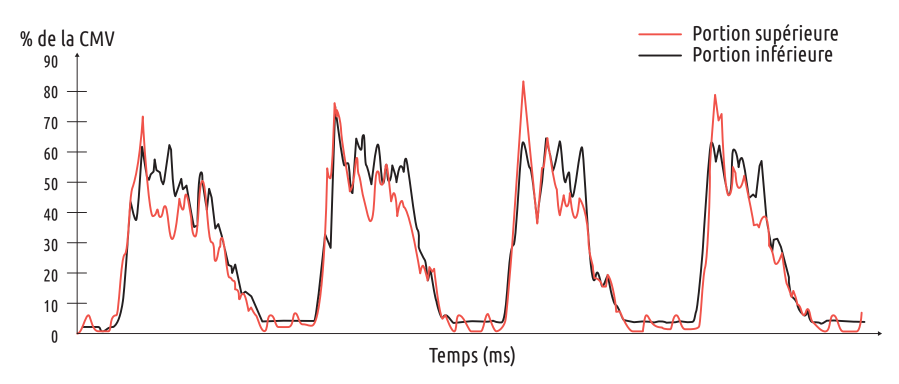


Figure 5 : Niveau d'activation de la portion supérieure et de la portion inférieure du droit de l'abdomen (rectus abdominis) enregistré lors de 4 répétitions d'un mouvement de "crunch" standard (rapprochement du sternum vers le pubis). Les valeurs ont été normalisées par rapport à la valeur d'activation maximale obtenue lors de la 1RM (pic d'activation) (d'après 25).

À présent, ce qui saute tout de suite aux yeux, c'est que les deux muscles ont pour ainsi dire le même niveau d'activation. La partie haute et la partie basse sont activées de la même façon et avec la même intensité relative (%1RM) dans le crunch. Cette expérience a été reproduite pour un mouvement inverse (rapprochement pubis vers sternum) censé activer davantage le bas que le haut du RA... avec le même résultat. Parler d'exercices d'abdominaux renforçant le haut ou le bas de façon spécifique serait donc une notion erronée. Cela voudrait dire que le cerveau est capable d'activer individuellement chacune des portions du RA et de le faire de façon plus ou moins intense... Cela ne semble pas le cas. Alors pourquoi dire qu'il existe des exercices d'abdominaux pour le haut et pour le bas ?

Vous l'aurez compris : la normalisation apporte un éclairage beaucoup plus objectif que le simple enregistrement brut. Elle nous donne accès à des informations plus pertinentes concernant la façon dont les synergies musculaires et les activations musculaires se font. Il y a des variations de ces paramètres selon le contexte mécanique (posture, gravité, etc.) dans lequel se fait le mouvement.

Le coin des matheux

Exemple de méthodes de normalisation en EMG ou ECG :

1 • X_norm = [x - min(x)] / [max(x) - min(x)] ; où x est une valeur mesurée à un instant t, max(x) et min(x) sont respectivement les valeurs maximale et minimale obtenues lors de l'enregistrement.

2 • X_norm = [x - moyenne(x)] / écartype(x) ; où x est une valeur mesurée à un instant t, moyenne(x) est la valeur moyenne des données, écartype(x), la déviation standard.

2 • L'analyse fonctionnelle

Le tirage nuque : le mouvement à bannir

(Dorsibarre ou Lat Pull Down) versus le tirage poitrine (Front lat Pull Down).
Avant de détailler les 2 approches, un rappel des mouvements.

Tableau 5

Vue d'ensemble du tirage nuque	
Consignes	• Saisir la barre les mains en pronation (paumes vers le bas) avec un écartement supérieur à la largeur des épaules. • Les membres supérieurs sont en extension vers le haut. • Incliner légèrement le buste en avant puis descendre la barre en léger contact avec la nuque (ou s'arrêter à la base du crâne). • Revenir à la position initiale dans un mouvement d'extension complète, sans à-coups. • Durant le mouvement, il n'y a pas de balancement du buste d'avant en arrière (muscles stabilisateurs, gainage) : celui-ci doit rester fixe et stable.
Respiration	• Expiration durant la phase qui attire la barre vers la poitrine (concentrique). • Inspiration durant la phase de relâchement (excentrique).
Muscles moteurs	• Biceps Brachial • Brachio-radial • Grand dorsal • Rhomboïde (petit et moyen) • Grand rond • Trapèze partie inférieure • Deltoïde postérieur
Erreur courante	• Trop arrondir le dos (hypercyphose)

Tableau 6

Vue d'ensemble du tirage poitrine	
Consignes	• Saisir la barre les mains en pronation (paumes vers le bas) avec un écartement supérieur à la largeur des épaules. Les membres supérieurs sont en extension vers le haut. • Incliner légèrement le buste en arrière puis descendre la barre en léger contact sur le haut de la poitrine. • Revenir à la position initiale dans un mouvement d'extension complète, sans à-coups. • Durant le mouvement, il n'y a pas de balancement du buste d'avant en arrière (muscles stabilisateurs, gainage) : celui-ci doit rester fixe et stable.
Respiration	• Expiration durant la phase qui attire la barre vers la poitrine (concentrique). • Inspiration durant la phase de relâchement (excentrique).
Muscles moteurs	• Biceps Brachial • Brachio-radial • Grand dorsal • Grand pectoral • Trapèze partie inférieure • Rhomboïde (petit et moyen) • Grand rond
Erreur courante	• Trop cambrer le dos (hyperlordose lombaire)

Avez-vous observé des sportifs ou des débutants effectuer le dorsibarre ?

Ils se sentent obligés de pencher la tête en avant pour ne pas se cogner avec la barre, ils fléchissent le tronc pour terminer le mouvement, ils ne semblent pas à l'aise.

D'un point de vue descriptif, en partant d'une adduction du bras à 90°, rotation latérale forcée, nous demandons à l'articulation de travailler sur la hauteur (dans le plan frontal). Cette position n'est pas naturelle pour l'articulation, il n'y a rien de fonctionnel, pas d'application sportive, rien à en retirer d'un point de vue performance. Aucun singe au monde ne cherche à se lever à une branche d'arbre en portant cette dernière à la nuque : il la passe devant la tête, il en est de même pour nous, nous ne pouvons grimper à quoi que ce soit en tirage nuque.

Il a déjà été démontré que cet exercice n'est pas le meilleur pour le grand dorsal, qu'il n'a pas de réel utilité fonctionnelle hormis tenter de justifier une variante d'exercice. Mais il est encore plébiscité par de nombreux professionnels bien que l'épaule soit très traumatisée en musculation.

Est-il si traumatisant ?

Il faut bien comprendre que l'expérience de certains piliers de salle de musculation influence le pratiquant. Puisque cette personne ne s'est pas blessée durant ses 20 ans de musculation sur cet exercice et qu'il le conseille, alors je peux le faire. Pour un qui ne se blesse pas, combien se blessent ?

Le dorsibarre, toujours à l'usage dans les salles de remise en forme, est pourtant connu pour engendrer des conflits sous-acromiaux. Dans 25 % des cas de blessures attribuées à la musculation, la prévalence de la blessure de l'épaule est de 36 %, cela représente donc 9 % des pratiquants qui possèdent un problème d'épaule. 25 % des blessures restent attribués à un manque d'informations ou d'encadrement.

Sur 46 athlètes présentant une ostéolyse de l'épaule, 45 pratiquent la musculation dans des angles favorisant la venue de la blessure.

Le conflit sous-acromial est également un problème fréquent. Il est admis qu'il faut entre 10 et 15 années (parfois beaucoup moins) pour engendrer ce dernier. Rappel : *la coiffe des rotateurs est constituée du subscapulaire (sous-scapulaire), infra-épineux (sous-épineux), supra-épineux (sus-épineux) et petit rond. Le long biceps se trouve dans un plan plus profond recouvert*

par le supra-épineux, ne pas confondre avec les rotateurs internes (médiaux) ou externes (latéraux). De manière plus générale, une étude d'avril 2010 (55) a répertorié les mouvements à éviter au niveau de l'épaule. La rotation latérale forcée du bras en position haute (tirage nuque, développé nuque…) en fait partie. Lorsque le bras est dans cette position, le tubercule majeur de l'humérus vient s'écraser sur le toit de l'articulation, mais physiquement il est arrêté par la masse des tendons qui se retrouvent en contrainte entre les deux os. Cette agression répétée est néfaste. Le problème est d'origine mécanique car, contrairement à la croyance, le tendon est bien vascularisé (conférence personnelle en dissection de J. Sharkey, Dublin, mai 2013).

Dans le cadre de l'entraînement sportif, nous allons vous convaincre d'éviter voire d'arrêter ce mouvement.

Comparaison de quatre styles

Cette étude de Signorile et coll. (42) a été bien pensée. Elle part d'une étude statistique sur 1 053 personnes. Après avoir mis en ligne 4 images (reproduites à l'identique dans le tableau page suivante) , il a été demandé quels mouvements travaillaient au mieux le grand dorsal. 150 personnes ont répondu le *back pull-down* (tirage nuque) et 903 le *front pull-down* (tirage poitrine). Ce test ne résiste pas en France, nous pourrions inverser les chiffres. Or, les votants sur le site du NSCA ont raison.

Il a été enregistré les EMG de 10 personnes en bonne santé (de 18 à 50 ans avec une moyenne vers 27 ans) avec un minimum d'une année de pratique en musculation (la moyenne avait 5,9 ans d'expérience).

Le tableau page suivante démontre que le muscle grand dorsal est bien mieux sollicité sur la forme du tirage poitrine suivi par le tirage mains en supination serrée que sur celle du tirage nuque (troisième position sur les quatre testées). De plus, en ce qui concerne le poids total, c'est encore le tirage poitrine qui gagne ; il y a aussi une meilleure sollicitation du grand rond. Nous regrettons que l'étude ne se soit pas portée également sur le biceps brachial.

Tableau 7 : (+ = quantité d'activation ; (x) = ordre de recrutement)

Lat pull-down	Close grip	Supinated grip	Wide grip antérieur	Wide grip postérieur
	Activité durant la phase concentrique			
Grand dorsal	++++ (4)	++++++ (2)	++++++++ (1)	++++++ (3)
Grand pectoral	++++++++ (1)	++++++ (2)	+++++ (3)	++++ (4)
Deltoïde postérieur	++++++++ (1)	+++++ (3)	++++++ (2)	++++ (4)
Longue portion du triceps brachial	+++++ (3)	++++ (4)	++++++++ (1)	++++++ (2)
Grand rond	++++ (4)	+++++ (3)	++++++++ (1)	++++++ (2)
	Activité durant la phase excentrique			
Grand dorsal	++++ (4)	+++++ (3)	++++++++ (1)	++++++ (2)
Grand pectoral	++++++++ (1)	+++++ (3)	++++ (4)	++++++ (2)
Deltoïde postérieur	++++++++ (1)	++++++ (2)	+++++ (3)	++++ (4)
Longue portion du triceps brachial	++++ (4)	+++++ (3)	++++++++ (1)	++++++ (2)
Grand rond	++++ (4)	++++++ (2)	++++++++ (1)	+++++ (3)

En tirage poitrine :

- muscle grand dorsal, grand rond et long chef du triceps plus activés ;
- épaule protégée ;
- rôle plus fonctionnel ;
- apprentissage plus facile.

Nous ne trouvons pas d'argument favorable pour le tirage nuque.

Le Tirage menton









Figure 6 : Position des mains en tirage menton (29)

Une publication très intéressante de cette année analyse l'impact de la prise de barre sur l'activation des muscles lors d'un tirage vertical réalisé en position debout, avec arrêt des bras à l'horizontale (coudes à hauteur d'épaule) (29). Les sujets doivent séparer leurs mains de 50 %, 100 % et 200 % de la largeur bi-acromiale. Les muscles analysés sont :

- le deltoïde antérieur ;
- le deltoïde moyen ;
- le deltoïde postérieur ;
- le trapèze supérieur ;
- le trapèze moyen ;
- le biceps brachial.

La charge est fixée à 85 % de la 1RM déterminée pour la largeur bi-acromiale de 100 %. Les résultats sont résumés dans les deux tableaux suivants.

Tableau 8	Variation d'activité en fonction de la phase de mouvement	
	Concentrique	Excentrique
deltoïde antérieur	o	o
deltoïde moyen	↗	↗
deltoïde postérieur	↗	o
trapèze supérieur	o	↗
trapèze moyen	o	↗
biceps brachial	o	↗

Variation d'activité en fonction de la largeur de la prise

Tableau 9	Concentrique			Excentrique		
	50 %	100 %	200 %	50 %	100 %	200 %
deltoïde antérieur	XX	XX	XX	XX	XX	XX
deltoïde moyen	XX	XXX	XXXX	XX	XXX	XXXX
deltoïde postérieur	XX	XX	XXXX	XX	XX	XX
trapèze supérieur	XX	XX	XX	XX	XXX	XXXX
trapèze moyen	XX	XX	XX	XX	XXX	XXXX
biceps brachial	XX	XX	XX	XXXX	XXX	XX

Hormis le biceps dont l'activité diminue en phase excentrique et reste inchangée en phase concentrique, il y a une augmentation de l'activation générale du deltoïde et du trapèze avec l'élargissement de la prise de barre selon la phase de mouvement. Le deltoïde antérieur ayant principalement un rôle de stabilisateur de la tête humérale dans ce type d'exercice, son activation reste inchangée.

Le développé couché

Nous avons détaillé le dorsibarre puisqu'il s'agit d'un mouvement phare pour le membre supérieur et comme expliqué, nous lui préférons le tirage poitrine. Nous n'avons pas discuté du tirage horizontal (ou *rowing* assis ou

seated low row) car il n'y a pas de piège sur cet exercice. En revanche, il est antagoniste (contraire) du développé couché que nous allons détailler dans cette partie.

Tableau 10

Vue d'ensemble	
Consignes	• Saisir la barre les mains en pronation (paumes vers le bas) avec un écartement supérieur à la largeur des épaules. Les membres supérieurs sont en extension vers le haut. • Incliner légèrement le buste en arrière puis descendre la barre en léger contact sur le haut de la poitrine. Les membres inférieurs peuvent être sur le banc, nous les préférons au sol pour plus de stabilité. • Revenir à la position initiale dans un mouvement d'extension complète, sans à-coups. • Durant le mouvement, il faut limiter la poussée asymétrique des bras.
Respiration	• Inspiration dans la phase excentrique en descendant la barre en léger contact sur la poitrine. • Expiration dans la phase concentrique en poussant la barre vers le haut, verticalement.
Muscles moteurs	• Grand pectoral • Triceps brachial • Deltoïde antérieur • Anconé • Coraco-brachial • Sub-scapulaire
Erreur courante	• Trop cambrer le dos (hyperlordose lombaire) hors du cadre de la compétition du développé couché. • La tension se trouvant déjà portée sur les épaules et la nuque, il n'y a pas besoin d'ajouter de pression sur cette zone hors des compétitions spécifiques de développé couché.

En termes de préparation physique, c'est un développement de la force, de l'explosivité ou de la masse musculaire qui est visé par cet exercice.

Influence du type de mouvement et du type de prise

Une publication intéressante d'EMG démontrait l'intérêt en termes de force sur 5 muscles et 4 styles différents à la fois en prise large et serrée, ce qui offrait 8 possibilités pour l'application terrain.
Étude sur 6 hommes de 20 à 27 ans avec 2 ans d'expérience au minimum ; taille de 171,5 cm à 184,5 cm ; 77,5 kg à 93,5 kg.
Après avoir obtenu la RM dans les différents exercices et les différentes prises, l'étude se fait à 80 % de la RM.

Les 4 mouvements :

Il est démontré l'intérêt du DC décliné (18°), horizontal, incliné (40°) et la presse militaire (vertical).

Prise :
- En prise serrée (l'espacement des acromions).
- En prise large (espacement double des acromions ou épaules).

Les 5 sites musculaires observés :
- Grand pectoral partie sterno-costale
- Grand pectoral partie claviculaire
- Deltoïde antérieur
- Long chef du triceps
- Grand dorsal

Afin d'éviter une lecture difficile des différents graphiques, comme pour le dorsibarre, nous vous avons préparé un tableau récapitulatif.

Tableau 11 : (+ = quantité d'activation ; (x) = ordre de recrutement)

Les poussées du membre supérieur	DC décliné à 18°	Développé couché horizontal	Développé couché incliné à 40°	Presse militaire (verticale)
	Force total développée			
Prise large	++++++++ (1)	+++++++ (2)	++++++ (3)	++++ (4)
Prise serrée	+++++++ (1)	++++++ (2)	+++++ (3)	++++ (4)
	Grand pectoral partie sterno claviculaire			
Prise large	++++++++ (1)	+++++++ (2)	++++++ (3)	++++ (4)
Prise serrée	+++++++ (1)	++++++ (2)	+++++ (3)	++++ (4)
	Grand pectoral partie claviculaire			
Prise large	++++++ (3)	+++++ (2)	+++++ (1)	+++ (4)
Prise serrée	+++++++ (3)	++++++ (2)	++++++ (1)	++++ (4)
	Deltoïde antérieur			
Prise large	+++(4)	++++ (3)	+++++ (2)	++++++ (1)
Prise serrée	++++ (4)	+++++ (3)	++++ (2)	+++++ (1)
	Long triceps brachial			
Prise large	+++++ (2)	++++++ (1)	++++ (3)	+++ (4)
Prise serrée	++++++ (2)	+++++++ (1)	+++++ (3)	++++ (4)
	Grand dorsal Activité électrique 10 fois plus faible par rapport aux autres muscles			
Prise large	+++++ (1)	++++ (2)	++(4)	+++ (3)
Prise serrée	++++ (1)	++ (3)	+(4)	+++(2)

Une petite synthèse rapide serait :

Effet de l'inclinaison du tronc sur l'activité électrique *(donc la force développée)*.

Tableau 12

Muscles	Maximum*	Minimum
Grand pectoral partie sterno-costal	Horizontal	Vertical
Grand pectoral partie claviculaire	Incliné	Vertical
Deltoïde antérieur	Vertical	Décliné*
Long triceps brachial	Horizontal	Incliné
(*) Espacement mains large.		

Les conclusions pratiques :

- Le DC incliné sollicite plus les pectoraux que le DC horizontal.
- L'espacement des mains change l'activité des muscles (pectoral, claviculaire, long triceps), la réponse est plus forte avec la prise serrée.
- Le DC décliné pour faire travailler la partie "basse" du pectoral n'est pas justifié, l'EMG ne donne pas de résultat significatif ; nous pouvons faire pareil en DC "classique".
- La variation du mouvement est plus psychologique que biologique ; offrons au syndrome de Hans Selye toutes ses conséquences, ce que sur le terrain nous nommons "choquer le muscle".
- L'activation du deltoïde antérieur est supérieure dans la phase inclinée (presse militaire).
- AUCUN style ne sollicite le grand dorsal, ce muscle a pour rôle de maintenir une stabilité de l'articulation ; son intervention est normale mais il n'est jamais moteur.

Influence du type de machine

La comparaison d'un développé charge libre et charge guidée (machine "Smith", cadre guidé) a été réalisée récemment (40) avec 2 groupes de personnes (expérimentés et novices) et des charges de 70 et 90 % de la 1RM.

Les muscles deltoïdes antérieur et médian ainsi que le grand pectoral ont été analysés à partir de leur EMG normalisé.

Il ressort de ce travail que le deltoïde moyen est plus activé dans le mouvement réalisé à charge libre comparé au mouvement à la charge guidée, quels que soient la charge utilisée ou le niveau de pratique. Cela confirme son rôle de stabilisateur de l'épaule (tête huméral par rapport à la cavité glénoïde) lors de la réalisation de mouvements à charge libre en phase

concentrique. ***D'un point de vue descriptif, le deltoïde est un muscle considéré au niveau fonctionnel comme un ligament actif (notion qui explique sa fonction à stabiliser les segments osseux).*** Aucun effet n'a été trouvé pour le deltoïde antérieur et le grand pectoral.

En revanche, contrairement à leur hypothèse de départ, les auteurs n'ont pas trouvé de différence entre les 2 intensités utilisées pour les 2 formes de mouvement. Cela n'est pas surprenant car on sait depuis plus de 10 ans maintenant que la forme de nos mouvements est influencée par le champ gravitationnel.

Lorsque l'on observe un mouvement dans le plan sagittal, on note systématiquement que le déplacement d'un point particulier (la main par exemple) suit un trajet curviligne (23, 35, 43). La machine Smith affecte ce mouvement naturel et empêche le sujet d'exprimer sa force dans les meilleures conditions. Là où l'on attendait des performances plus élevées grâce à une meilleure stabilité, on obtient des performances similaires car le mouvement n'est pas réalisé dans des conditions qualifiées aujourd'hui "d'écologiques".

Une fois que vous avez pris connaissance de ses éclaircissements, il vous suffit de choisir le mode d'exercice en fonction de vos besoins.

Le squat

Quel bel exercice que le squat : une harmonie de gestion des contraintes sur tous les étages du corps. Très complet, il engage environ 200 muscles entre les stabilisateurs et les moteurs.

Tableau 13

Vue d'ensemble	
Consignes	• Position de départ debout, buste droit et stable, genoux verrouillés, la barre placée sur le trapèze moyen. • Amorcer le mouvement de flexion par la flexion des genoux et le déplacement du bassin en arrière et vers le bas comme pour venir s'asseoir sur une chaise. • Le buste se penche naturellement en avant, les genoux se déplacent vers la pointe du pied qu'ils peuvent éventuellement légèrement dépasser suivant la taille du sujet (longueur du fémur). L'appui s'effectue sur tout le pied (talon et avant-pied). • Arrêter le mouvement lorsque les cuisses arrivent vers l'horizontale ou un peu au-dessus.
Respiration	• Inspiration dans la phase excentrique lorsqu'on fléchit les jambes. • Expiration dans la phase concentrique lorsqu'on effectue l'extension des jambes pour revenir à la position initiale de départ.
Muscles moteurs	• Grand fessier • Ischio-jambiers • Quadriceps • Gastrocnémiens • Soléaire • Tibial postérieur • Fléchisseurs des orteils • Fléchisseur de l'hallux • Long et court fibulaire
Erreur courante	• Un manque de souplesse des chevilles entraînera peu de flexion des genoux avec une bascule importante et dangereuse du buste en avant et vers l'horizontale (travaillez donc la souplesse des chevilles en flexion et, si nécessaire, placez une cale sous les talons). • La consigne "poussez sur les talons" entendue régulièrement en cours de fitness semble inappropriée. • Les récepteurs plantaires assurant la proprioception et l'équilibre sont situés au niveau du gros orteil et de l'avant-pied, de plus au niveau pratique, cela décale le sportif vers l'arrière.

Mais sur les différentes études, les muscles qui ressortent comme muscles primaires sont :

- quadriceps ;
- ischio-jambiers ;
- gastrocnemiens.

La co-contraction de ces 3 muscles est le fondement de la stabilité du genou comme expliqué dans le paradoxe de Lombard.

La plus belle étude sur le squat provient sûrement de la synthèse de Escamila et coll. (11). Quinze pages sur les aspects du genou durant la flexion ; les cartilages, la patella (rotule), les ligaments et les muscles sont vus en détails sur les différents angles.

Cet exercice ne devrait pas vous faire si peur. Si aucune pathologie n'est décelée sur vos genoux ou si vous ne pratiquez pas un sport à contrainte sur cette articulation, profitez de ses avantages.

Si vous pratiquez un sport provoquant déjà des sollicitations connues au niveau du genou (ski, football...), nous préférons le squat barre devant *(front squat)*. En effet, la comparaison des deux mouvements de l'étude de Gullet et coll. (15) laisse à penser que les bénéfices musculaires seront les mêmes, pour une contrainte sur le genou nettement diminuée. Nous encadrons des footballeurs de très haut niveau (clubs prestigieux) et nous ne prenons jamais le risque de "charger" en squat nuque, encore une fois pour soulager le genou qui possède déjà une lourde semaine sportive.

Le pull-over

Le pull-over, est-ce un mouvement pour les pectoraux ou pour les dorsaux ? Nous entendons cela régulièrement, il semble que les professionnels ne soient pas d'accord entre eux.

Nous ne ferons que répondre à la question initiale : lorsque l'écartement est équivalent à celui de vos épaules, la participation supérieure du grand pectoral sur le grand dorsal est sans appel (54).

Tableau 14

Vue d'ensemble	
Consignes	• Allongé sur le dos, jambes au sol ou sur un banc perpendiculaire (dépend de la taille du sujet et de la position du rachis lombaire une fois installé). • Départ avec l'haltère à bout de bras, coudes légèrement fléchis et en dedans, au-dessus de la poitrine. • Mouvement lent de bascule vers l'arrière et le bas, pour amener l'haltère en arrière de la tête. • Arrêter le mouvement lorsque les coudes se positionnent au niveau des oreilles ou un peu au-dessus. • Durant tout l'exercice le coude ne change pas son angulation (ni majoration de la flexion ni de l'extension). Le buste et le bassin sont également fixes sans exagération de la courbure lombaire.
Respiration	• Inspiration dans la phase excentrique lorsqu'on fléchit les jambes. • Expiration dans la phase concentrique lorsqu'on effectue l'extension des jambes pour revenir à la position initiale de départ.
Muscles moteurs	• Deltoïde postérieur • Long triceps • Grand rond • Grand dorsal • Grand pectoral • Élévateur de la scapula • Petit rhomboïde • Trapèze supérieur
Erreur courante	• Forcer sur les épaules. Hypercambrer sans raison.

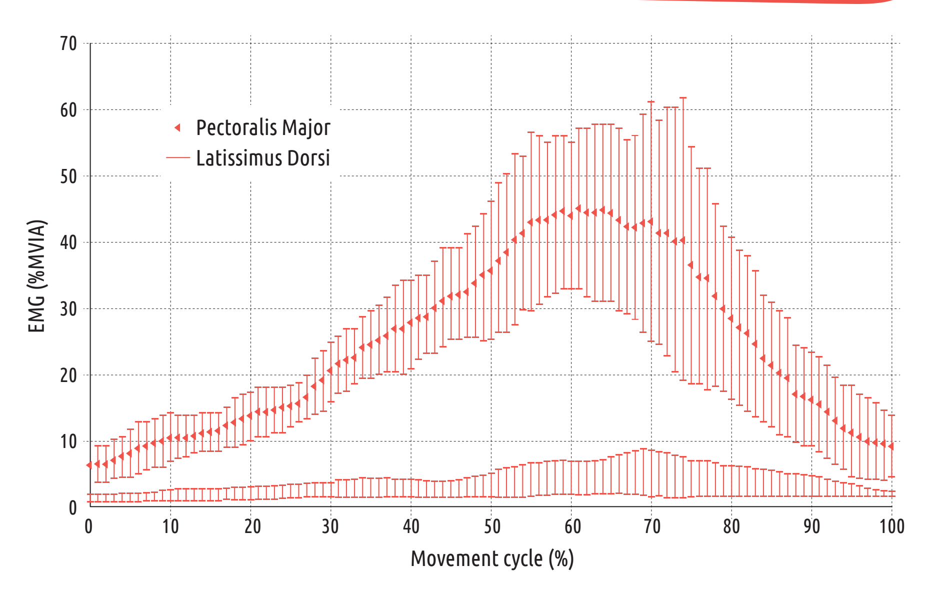


Figure 7 : Participation du grand dorsal et du grand pectoral dans le pull-over. D'après (54).

Le redressement de tronc ("crunch")

Ce mouvement est l'un des plus connus du renforcement abdominal. Les paramètres d'entraînement retenus lors de sa programmation peuvent avoir des retentissements très divers sur la charge imposée aux différents muscles cibles : droit de l'abdomen, oblique externe, oblique interne, transverse de l'abdomen en particulier. Les "faux amis" sont l'iliopsoas et le droit fémoral comme nous le verrons plus loin.

Plus encore, certaines des publications scientifiques que nous avons analysées, mettent en évidence des différences neuromusculaires pour un même exercice indiquant une grande disparité des réponses interindividuelles : les sujets ne font pas les mouvements de la même façon alors que les consignes sont identiques au départ (3, 7, 20, 24, 30, 33, 50).

Influence de la position du bassin, de la flexion du tronc et du genou

Selon la posture utilisée, certains mouvements sollicitant le tronc par un blocage des jambes ne semblent pas remplir le rôle qu'on leur attribue au

niveau de la musculature abdominale (4). Au contraire, l'utilisation d'exercices tels que le Janda sit-up (du nom du thérapeute tchèque, Vladimir JANDA, qui l'a inventé) s'avère bien plus efficace que toute autre forme pour se concentrer sur la face antérieure de l'abdomen. En effet, cet exercice permet de démontrer que l'on peut désactiver l'iliopsoas en demandant simplement à la personne d'enfoncer ses talons dans le sol ou dans les mains de l'entraîneur en maintenant les genoux fléchis à 90° (53) tel qu'illustré par la figure 8.

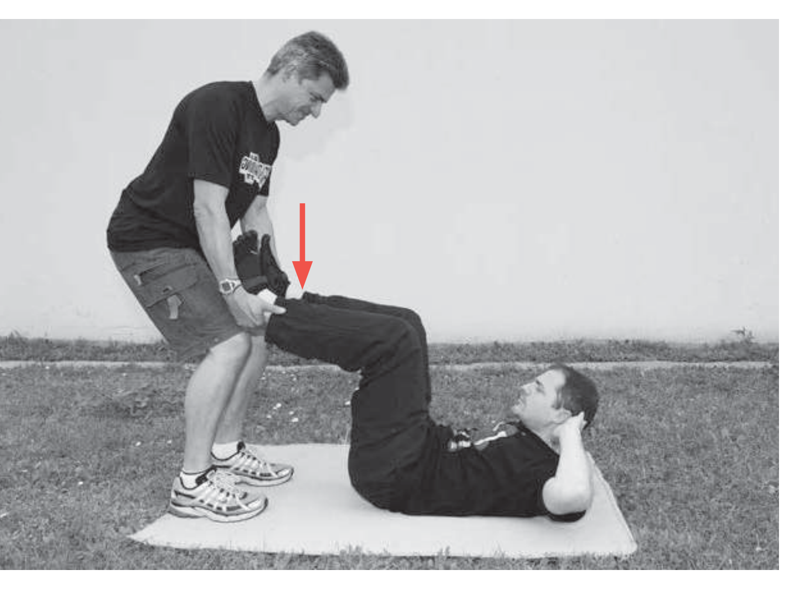


Figure 8 : Janda sit-up
Flèche rouge = sens de pression des talons dans les mains

La position du bassin semble plus importante que le maintien ou non des pieds dans le niveau de sollicitation du muscle transverse et du grand droit de l'abdomen lorsqu'il s'agit de limiter l'implication de l'iliopsoas. Une antéversion du bassin induit une diminution de l'activité du droit de l'abdomen alors qu'elle est similaire en position neutre ou rétroversée. La position rétroversée du bassin associée à une flexion de hanche à 90° et une flexion de genou du même angle couplée à une contraction du biceps fémoral (Janda sit-up) permettent de mettre l'emphase sur la partie antérieure de l'abdomen.

Activation musculaire dissociée

De nombreuses études utilisant la méthode de normalisation des EMG ont démontré qu'il était difficile (voire impossible) de solliciter de façon diffé-

renciée le haut et le bas du grand droit de l'abdomen contrairement aux idées véhiculées sur le terrain (5, 10, 12, 26, 41, 51, 53), chose qui n'apparaît pas si l'on ne fait pas de normalisation des signaux EMG (39). Il existe cependant un cas très spécifique : les danseuses du ventre. Chez elle, il a été démontré qu'un apprentissage de longue durée leur permettait de contrôler de façon alternée le haut et le bas du droit de l'abdomen lors des mouvements de vagues verticales qu'elles imposaient à leur musculature (34)... mais cela reste exceptionnel et surtout un travail qui va à l'opposé de la stabilité que l'on recherche notamment dans le gainage.

Importance des consignes

Les consignes données ont plus d'impact sur le travail des obliques que sur les autres muscles de la paroi abdominale dans l'apprentissage d'un mouvement dédié. Ces consignes sont notamment importantes si l'objectif est la désactivation de l'iliopsoas dont on sait qu'elle limite les niveaux de compression intervertébrale et soulage le stress imposé aux disques. (22, 32, 36, 53). Par exemple, demander de rentrer son nombril lors d'une flexion de la colonne entraîne une moins grande activation du droit de l'abdomen et de l'oblique externe tout en mettant l'emphase sur l'oblique interne et le transverse de l'abdomen (9, 21, 28, 37).

Vitesse de mouvement

La vitesse de mouvement modifie l'implication des muscles droit de l'abdomen, oblique interne et oblique externe (48). Plus la vitesse est élevée, plus il y a co-activation des muscles. Pour chaque cadence de répétition, le droit de l'abdomen et l'oblique interne sont les plus impliqués. L'implication de l'oblique externe augmente avec la vitesse du mouvement démontrant ainsi son rôle complémentaire dans la stabilisation de cette zone. On choisira donc la vitesse en fonction des objectifs ciblés au niveau renforcement.

Prévention des douleurs et action musculaire anticipée

Alors qu'il a été souvent oublié dans la littérature ancienne, le muscle transverse de l'abdomen semble être le *"premium movens"* des exercices sollicitant la ceinture abdominale. Il entretient une étroite collaboration avec le muscle multifide, avec qui il stabilise rapidement le rachis par anticipation des forces de réaction (notamment les forces de cisaillement vertébral lorsque l'on implique le membre inférieur), et ce quelle que soit la direction de la force imposée au mouvement (14, 16, 18, 19, 27, 44, 52). Une grande partie des lombalgies seraient donc liées à un manque d'anticipation de ces deux muscles par manque de sollicitations régulières, manque qui entraînerait par la suite des contraintes notamment de cisaillement (mouvement de glissements) sur cette charnière (38). Par ailleurs, il est plus judicieux de réfléchir aux mouvements en termes de stabilisation du bassin et/ou stabilisation du tronc selon les synergies musculaires que l'on souhaite engager (31, 46, 49) car le travail trop analytique ne permet pas de préparer l'athlète à cette stabilisation globale (14) qui est au cœur de l'anticipation des mouvements, anticipation qui participe elle-même à la prévention des douleurs ou blessures au niveau lombaire notamment. Cependant, lorsqu'on a affaire à un sujet qui a des douleurs chroniques au niveau lombaire, et qu'un bilan musculaire fait apparaître un manquement au niveau du transverse, il est intéressant de noter que le travail spécifiquement orienté sur ce muscle permet à nouveau de l'activer de façon anticipée et ainsi prévenir les contraintes au niveau lombaire (6, 17, 45, 47).

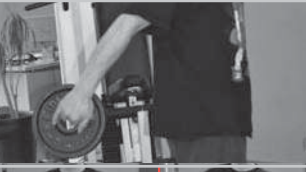
Conclusion

Ces résultats ne vont pas dans le sens de ce qui est communément admis dans les ouvrages les plus cités sur le terrain ou dans les formations. Les synergies musculaires ne sont pas aussi simples qu'il n'y paraît. Cela pourrait expliquer pourquoi, pour un même mouvement, certaines personnes ne ressentent rien alors que d'autres le trouvent très efficace.

3 • Les mouvements en un clin d'œil !

Afin de faciliter la recherche des muscles principaux concernés par les mouvements de musculation, nous proposons ces tableaux pratiques.

Tableau 15

Épaule/Bras (articulation humérale ou gléno-humérale)	
	**Abduction :** • Supra-épineux (sus-épineux) • Deltoïde • Chef-long du biceps brachial
Les 3 temps de l'abduction : • De 0 à 60° : supra-épineux et deltoïde moyen. • De 60 à 120° : s'y ajoute le trapèze faisceau supérieur et le grand dentelé. • De 120 à 180° : hyperlordose si un seul côté provoquée par la contraction des muscles spinaux.	
	**Adduction :** • Grand pectoral • Grand dorsal • Grand rond
	**Antépulsion :** • Faisceau supérieur du grand pectoral • Coraco-brachial • Deltoïde antérieur • Biceps brachial courte portion
	**Rétropulsion :** • Deltoïde postérieur • Grand dorsal • Grand rond • Long triceps
	**Rotation latérale (externe) ou exorotation :** • Petit rond • Infra-épineux (sous-épineux) • Deltoïde postérieur

	Rotation médiale (interne) ou endorotation : • Grand pectoral • Grand dorsal • Grand rond • Subscapulaire (sous-scapulaire) • Deltoïde antérieur

TABLEAU 16 : COUDE

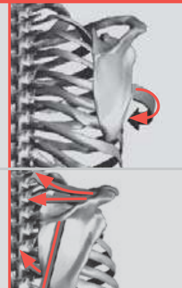
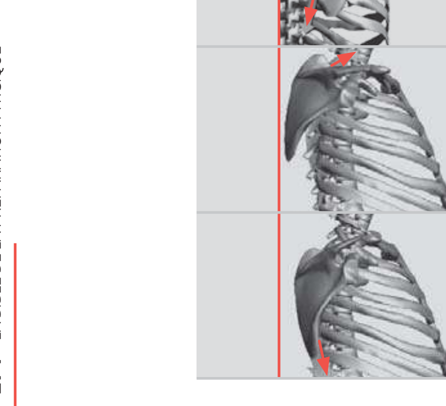
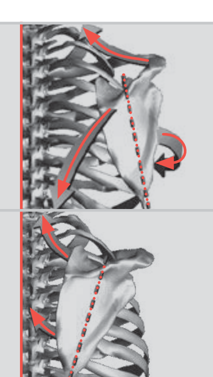
	Flexion : • Biceps brachial • Brachial • Brachio-radial (long supinateur) • Rond pronateur
	Extension : • Triceps brachial • Ancôné

TABLEAU 17 : SCAPULO-THORACIQUE

	Abduction : • Dentelé antérieur • Accessoirement petit et grand pectoraux
	Adduction : • Trapèze moyen • Petit et grand rhomboïdes • Grand dorsal, s'il s'insère sur l'angle inférieur de la scapula (45 %)
	Élévation : • Trapèze supérieur • Élévateur de la scapula • Petit rhomboïde • Grand rhomboïde
	Abaissement : • Trapèze inférieur • Dentelé antérieur • Petit pectoral • Grand dorsal

	Sonnette latérale : • Trapèze supérieur • Dentelé antérieur
	Sonnette médiale : • Élévateur de la scapula • Petit et grand rhomboïdes
TABLEAU 18 : HANCHE (articulation coxo-fémorale)	
	Flexion : • Droit fémoral (droit antérieur) • Sartorius (couturier) • Iliopsoas • Tenseur du fascia lata • Gracile • Pectiné • Long adducteur • Court adducteur • Grand adducteur • Moyen fessier (fibres antérieures)
	Extension : • Grand fessier • Semi-membraneux • Semi-tendineux • Biceps fémoral • Moyen fessier (fibres postérieures)
	Abduction : • Tenseur du fascia lata • Petit fessier • Moyen fessier • Piriforme
	Adduction : • Long adducteur • Court adducteur • Grand adducteur • Pectiné • Gracile • Carré fémoral

	**Rotation latérale :** • Grand fessier • Iliopsoas • Muscles pelvi-trochantériens • Sartorius
	**Rotation médiale :** • Moyen fessier • Petit fessier • Tenseur du fascia lata

Les adducteurs sont fléchisseurs de 0 à 50° et extenseurs à partir de 60°…

TABLEAU 19 : GENOU	
	Extension : • Droit fémoral • Vaste latéral • Vaste médial • Vaste intermédiaire • Tenseur du fascia-lata
	**Flexion :** • Semi-tendineux • Semi-membraneux • Biceps fémoral • Sartorius • Gracile • Gastrocnémiens • Poplité

Rotation latérale de 40º, le muscle moteur est le biceps fémoral.
Rotation médiale de 30º, les muscles moteurs sont les muscles de la patte d'oie (gracile, sartorius et semi-tendineux).

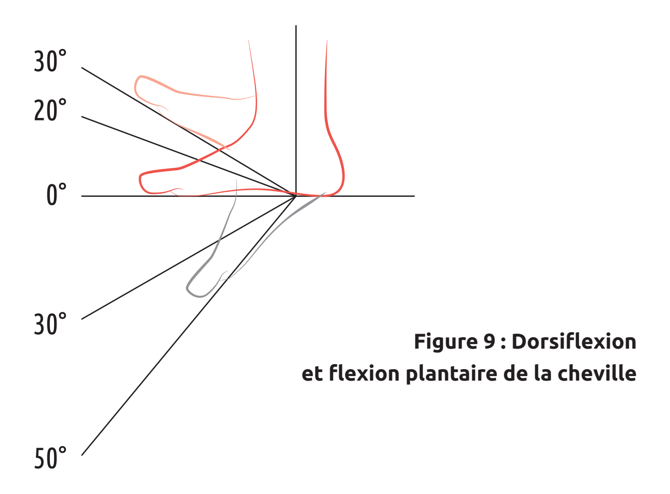
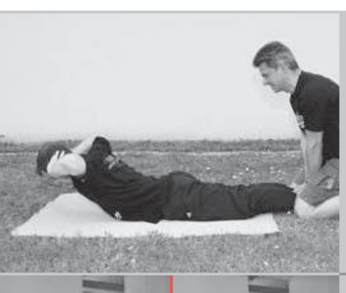


Figure 9 : Dorsiflexion et flexion plantaire de la cheville

TABLEAU 20 : CHEVILLE	
	Flexion plantaire (extension) : • Gastrocnémiens latéral et médial • Soléaire • Tibial postérieur • Long et court fibulaire • Long fléchisseur de l'hallux • Long fléchisseur des orteils
	Flexion dorsale (flexion) : • Tibial antérieur • Long extenseur de l'hallux • Long extenseur des orteils

TABLEAU 21 : COLONNE VERTEBRALE	
	Flexion : • Grand droit de l'abdomen • Oblique interne • Oblique externe



Extension :
- Multifides
- Longissimus
- Iliocostal
- Transversaires épineux
- Muscle spinal
- Intertransversaires
- Semi-spinaux



Rotations :
- Multifides
- Oblique externe
- Iliocostal
- Muscle semi-spinaux
- Muscles rotateurs



Inclinaison latérale :
- Carré des lombes
- Oblique externe
- Muscle spinal
- Longissimus

TABLEAU 22 : MOUVEMENTS GLOBAUX



- Anconé
- Triceps
- Deltoïde antérieur
- Coraco-brachial
- Sous-scapulaire
- Grand pectoral
- Grand dentelé (si mouvement d'épaules)



- Grand fessier
- Ischio-jambiers
- Quadriceps
- Gastrocnémiens...



- Biceps
- Brachial
- Brachio-radial
- Deltoïde postérieur
- Grand rond
- Grand dorsal
- Long triceps
- Trapèze moyen

- Anconé
- Triceps
- Supra-épineux
- Deltoïde antérieur
- Coraco-brachial
- Trapèze supérieur
- Dentelé antérieur

Nous déconseillons fortement le développé nuque, nous lui préférons le développé militaire.



- Anconé
- Triceps
- Grand rond
- Grand pectoral
- Grand dorsal
- Deltoïde antérieur
- Coraco-brachial





- Biceps
- Brachial et brachio-radial
- Grand dorsal
- Grand pectoral
- Rhomboïde (petit et moyen)

Conclusion

Comprendre que nous sommes différents permet de comprendre le développement physique parfois étonnant d'athlètes : "Il a des bras mais pas d'épaules...", en effet, peut-être a-t-il des muscles absents ou sous-développés. Les complexes physiques proviennent d'une analyse intuitive ?

Choisir un mouvement de musculation est fonction du groupe musculaire à développer. Le geste spécifique doit être la finalité. Il faudra s'orienter sur un exercice ressemblant à la discipline exercée, développer les bons muscles avec d'autres exercices si besoin, l'important étant de ne pas se blesser.

Pour aller plus loin sur les exercices possibles, nous vous conseillons d'autres ouvrages plus spécialisés. Nous ne voulions traiter que les erreurs courantes ou les "pièges" possibles.

Bibliographie

• 1 • Basmajian JV and De Luca CJ. Muscles alive, their functions revealed by electromyography. Baltimore: Williams & Wilkins, 1985.

• 2 • Botar J. Sur quelques variations des muscles de l'avant-bras. Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris 2: 25-33, 1931.

• 3 • Brown SH, Vera-Garcia FJ, and McGill SM. Effects of abdominal muscle coactivation on the externally preloaded trunk: variations in motor control and its effect on spine stability. Spine 31: E387-393, 2006.

• 4 • Burden AM and Redmond C. Abdominal and hip flexor muscle activity during two-minutes of sit-ups and curl-ups. The Journal of Strength & Conditioning Research Publish Ahead of Print: 10.1519/JSC.1510b1013e318278f318270ac, 2012.

• 5 • Clark KM, Holt LE, and Sinyard J. Electromyographic Comparison of the Upper and Lower Rectus Abdominis During Abdominal Exercises. The Journal of Strength & Conditioning Research 17: 475-483, 2003.

• 6 • David P, Mora I, and Perot C. Neuromuscular efficiency of the rectus abdominis differs with gender and sport practice. J Strength Cond Res 22: 1855-1861, 2008.

• 7 • Davidson KL and Hubley-Kozey CL. Trunk muscle responses to demands of an exercise progression to improve dynamic spinal stability. Archives of physical medicine and rehabilitation 86: 216-223, 2005.

• 8 • De Luca C. The Use of Surface Electromyography in Biomechanics. Journal of Applied Biomechanics 13: 135-163, 1997.

• 9 • Drysdale CL, Earl JE, and Hertel J. Surface Electromyographic Activity of the Abdominal Muscles During Pelvic-Tilt and Abdominal-Hollowing Exercises. J Athl Train 39: 32-36, 2004.

• 10 • Duncan M. Muscle activity of the upper and lower rectus abdominis during exercises performed on and off a Swiss ball. Journal of bodywork and movement therapies 13: 364-367, 2009.

• 11 • Escamilla RF. Knee biomechanics of the dynamic squat exercise. Med Sci Sports Exerc 33: 127-141, 2001.

• 12 • Escamilla RF, McTaggart MS, Fricklas EJ, DeWitt R, Kelleher P, Taylor MK, Hreljac A, and Moorman CT. An electromyographic analysis of commercial and common abdominal exercises: implications for rehabilitation and training. J Orthop Sports Phys Ther 36: 45-57, 2006.

• 13 • Fischer H. Quelques observations d'anthropologie anatomique. Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris 8: 189-201, 1927.

• 14 • Gardner-Morse MG and Stokes IAF. The Effects of Abdominal Muscle Coactivation on Lumbar Spine Stability. Spine 23: 86-91, 1998.

• 15 • Gullett JC, Tillman MD, Gutierrez GM, and Chow JW. A biomechanical comparison of back and front squats in healthy trained individuals. J Strength Cond Res 23: 284-292, 2009.

• 16 • Hodges PW. Is there a role for transversus abdominis in lumbo-pelvic stability? Manual therapy 4: 74-86, 1999.

• 17 • Hodges PW. Changes in motor planning of feedforward postural responses of the trunk muscles in low back pain. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 141: 261-266, 2001.

• 18 • Hodges PW and Richardson CA. Contraction of the abdominal muscles associated with movement of the lower limb. Physical therapy 77: 132-142; discussion 142-134, 1997.

• 19 • Hodges PW and Richardson CA. Feedforward contraction of transversus abdominis is not influenced by the direction of arm movement. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 114: 362-370, 1997.

• 20 • Hubley-Kozey CL, Hatfield GL, and Davidson KC. Temporal Coactivation of Abdominal Muscles During Dynamic Stability Exercises. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 1246-1255 1210.1519/JSC.1240b1013e3181ce1224c1247, 2010.

• 21 • Hubley-Kozey CL and Vezina MJ. Muscle activation during exercises to improve trunk stability in men with low back pain. Archives of physical medicine and rehabilitation 83: 1100-1108, 2002.

• 22 • Karst GM and Willett GM. Effects of specific exercise instructions on abdominal muscle activity during trunk curl exercises. J Orthop Sports Phys Ther 34: 4-12, 2004.

• 23 • Kerlirzin Y, Pozzo T, Dietrich G, and Vieilledent S. Effects of kinematics constraints on hand trajectory during whole-body lifting tasks. Neuroscience letters 277: 41-44, 1999.

• 24 • Konrad P, Schmitz K, and Denner A. Neuromuscular Evaluation of Trunk-Training Exercises. J Athl Train 36: 109-118, 2001.

• 25 • Lehman GJ and McGill SM. The importance of normalization in the interpretation of surface electromyography: a proof of principle. Journal of manipulative and physiological therapeutics 22: 444-446, 1999.

• 26 • Lehman GJ and McGill SM. Quantification of the differences in electromyographic activity magnitude between the upper and lower portions of the rectus abdominis muscle during selected trunk exercises. Physical therapy 81: 1096-1101, 2001.

• 27 • MacDonald DA, Moseley GL, and Hodges PW. The lumbar multifidus: does the evidence support clinical beliefs? Manual therapy 11: 254-263, 2006.

• 28 • Mannion AF, Caporaso F, Pulkovski N, and Sprott H. Spine stabilisation exercises in the treatment of chronic low back pain: a good clinical outcome is not associated with improved abdominal muscle function. European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 21: 1301-1310, 2012.

• 29 • McAllister MJ, Schilling BK, Hammond KG, Weiss LW, and Farney TM. Effect of Grip Width on Electromyographic Activity During the Upright Row. The Journal of Strength & Conditioning Research 27: 181-187 110.1519/JSC.1510b1013e31824f31823ad, 2013.

• 30 • McGill SM. A myoelectrically based dynamic three-dimensional model to predict loads on lumbar spine tissues during lateral bending. J Biomech 25: 395-414, 1992.

• 31 • McGill SM. A revised anatomical model of the abdominal musculature for torso flexion efforts. J Biomech 29: 973-977, 1996.

• 32 • Miller MI and Medeiros JM. Recruitment of internal oblique and transversus abdominis muscles during the eccentric phase of the curl-up exercise. Physical therapy 67: 1213-1217, 1987.

• 33 • Monfort-Panego M, Vera-Garcia FJ, Sanchez-Zuriaga D, and Sarti-Martinez MA. Electromyographic studies in abdominal exercises: a literature synthesis. Journal of manipulative and physiological therapeutics 32: 232-244, 2009.

• 34 • Moreside JM, Vera-Garcia FJ, and McGill SM. Neuromuscular independence of abdominal wall muscles as demonstrated by middle-eastern style dancers. Journal of Electromyography and Kinesiology 18: 527-537, 2008.

• 35 • Papaxanthis C, Pozzo T, Vinter A, and Grishin A. The representation of gravitational force during drawing movements of the arm. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 120: 233-242, 1998.

• 36 • Parfrey KC, Docherty D, Workman RC, and Behm DG. The effects of different sit- and curl-up positions on activation of abdominal and hip flexor musculature. Appl Physiol Nutr Metab 33: 888-895, 2008.

• 37 • Pulkovski N, Mannion AF, Caporaso F, Toma V, Gubler D, Helbling D, and Sprott H. Ultrasound assessment of transversus abdominis muscle contraction ratio during abdominal hollowing: a useful tool to distinguish between patients with chronic low back pain and healthy controls? European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 21 Suppl 6: S750-759, 2012.

• 38 • Richardson CA, Snijders CJ, Hides JA, Damen L, Pas MS, and Storm J. The relation between the transversus abdominis muscles, sacroiliac joint mechanics, and low back pain. Spine 27: 399-405, 2002.

• 39 • Sarti MA, Monfort M, Fuster MA, and Villaplana LA. Muscle activity in upper and lower rectus abdominus during abdominal exercises. Archives of physical medicine and rehabilitation 77: 1293-1297, 1996.

• 40 • Schick EE, Coburn JW, Brown LE, Judelson DA, Khamoui AV, Tran T, Uribe BP, and Reyes C. A Comparison Of Muscle Activation Between A Smith Machine And Free Weight Bench Press. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 1 10.1097/1001.JSC.0000367207.0000318161.d0000367207, 2010.

• 41 • Schoffstall JE, Titcomb DA, and Kilbourne BF. Electromyographic Response of the Abdominal Musculature to Varying Abdominal Exercises. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 3422-3426 3410.1519/JSC.3420b3013e3181e74315, 2010.

• 42 • Signorile JF, Zink AJ, and Szwed SP. A comparative electromyographical investigation of muscle utilization patterns using various hand positions during the lat pull-down. J Strength Cond Res 16: 539-546, 2002.

• 43 • Stapley PJ, Pozzo T, Cheron G, and Grishin A. Does the coordination between posture and movement during human whole-body reaching ensure center of mass stabilization? Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 129: 134-146, 1999.

• 44 • Stokes IA, Gardner-Morse MG, and Henry SM. Abdominal muscle activation increases lumbar spinal stability: analysis of contributions of different muscle groups. Clin Biomech (Bristol, Avon) 26: 797-803, 2011.

• 45 • Tsao H and Hodges PW. Immediate changes in feedforward postural adjustments following voluntary motor training. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 181: 537-546, 2007.

• 46 • Urquhart DM and Hodges PW. Differential activity of regions of transversus abdominis during trunk rotation. European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 14: 393-400, 2005.

• 47 • Urquhart DM, Hodges PW, and Story IH. Postural activity of the abdominal muscles varies between regions of these muscles and between body positions. Gait & posture 22: 295-301, 2005.

• 48 • Vera-Garcia FJ, Flores-Parodi B, Elvira JLL, and Sarti MÁ. Influence of Trunk Curl-Up Speed on Muscular Recruitment. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 684-690 610.1519/JSC.1510b1013e31816d35578, 2008.

• 49 • Vera-Garcia FJ, Moreside JM, and McGill SM. Abdominal muscle activation changes if the purpose is to control pelvis motion or thorax motion. J Electromyogr Kinesiol 21: 893-903, 2011.

• 50 • Vezina MJ and Hubley-Kozey CL. Muscle activation in therapeutic exercises to improve trunk stability. Archives of physical medicine and rehabilitation 81: 1370-1379, 2000.

• 51 • Whiting WC, Rugg S, Coleman A, and Vincent WJ. Muscle Activity During Sit-Ups Using Abdominal Exercise Devices. The Journal of Strength & Conditioning Research 13: 339-345, 1999.

• 52 • Willardson JM, Fontana FE, and Bressel E. Effect of surface stability on core muscle activity for dynamic resistance exercises. Int J Sports Physiol Perform 4: 97-109, 2009.

• 53 • Workman JC, Docherty D, Parfrey KC, and Behm DG. Influence of Pelvis Position on the Activation of Abdominal and Hip Flexor Muscles. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 1563-1569 1510.1519/JSC.1560b1013e3181739981, 2008.

• 54 • Marchetti PH. Effects of the pullover exercise on the pectoralis major and latissimus dorsi muscles as evaluated by EMG. J Appl Biomech 27:380 (2011).

• 55 • Kolber MJ, Beekhuizen KS, Cheng MS, Hellman MA. Shoulder injuries attributed to resistance training : a brief review. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 1696-1704, 2010

6

Comment développer sa force maximale ?

Sommaire

Apports de connaissances 285

Introduction 285
Pourquoi développer la force ?
Qu'avons-nous à y gagner ? 290
Utilité et importance de l'échauffement
pour le travail de force 293
Pourquoi gagnons-nous en force
sans prendre de masse musculaire ? 296
La musculation chez les jeunes 298
Ce qu'on pensait avant les années 80 300
Ce qu'on sait aujourd'hui 300
Évaluer son maximum (sa RM ou RM1 ; répétition maximale) 305
Les régimes de fonctionnement (contraction)
du muscle comme logique pour l'entraînement 310
Le régime concentrique (méthode "positive") 311
Le régime excentrique (méthode "négative") 313
Isométrie (méthode "statique") 315
Pliométrie (méthode "ressort") 317
Le déséquilibre musculaire
(entre les membres gauche et droit) 318
Déficit bilatéral 319
Quelques méthodes de développement de la force 320

Bibliographie 326

Apports de connaissances

Introduction

La force est considérée comme la qualité principale du muscle, celle dont découlent la puissance, la vitesse, l'explosivité... Le mouvement est une contraction musculaire dont la production de force est visible. Le muscle se contracte aussi de manière régulière mais sans produire de mouvement visible (force invisible ?) : c'est le tonus qui nous maintient à 37°. Nous ne nous rendons pas compte de ce phénomène. L'augmentation de ce dernier amène de la fièvre mais également des contractures, voire des courbatures, puisqu'il existe une augmentation des micro-contractions répétées et plus intenses induisant des tensions. Certains ne comprennent pas la présence de douleurs musculaires durant la fièvre ; le corps nous rappelle quelques réalités par moments.

Définitions de la force

Aspect mécanique :
"Toute cause capable de déformer un corps, d'en modifier l'état de repos ou de mouvement".
Cette définition assez physique nous aiguille mal dans la compréhension. Nous devrions approcher la force par une autre logique.
Aspect physiologique :
"Capacité du muscle à générer une tension (interne) suite à une stimulation nerveuse qui s'exprime par rapport à un segment corporel et/ou à une charge additionnelle (externe)".

La tension musculaire est donc influencée par plusieurs paramètres :
- nerveux : stimulation et coordination des unités motrices ;
- musculo-tendineux : génération et transmission de la tension ;
- hormonal : apport en énergie, croissance et multiplication cellulaire ;
- ostéo-ligamentaire : interaction interne et externe (jonctions musculo-tendineuses et ostéo-tendineuses, impact de la gravité sur le squelette).

Le terme de "tension" est préférable à celui de "contraction", car ce dernier est trop souvent associé à un seul type de travail musculaire (concentrique en l'occurrence).

Que se passe-t-il si nous gagnons en force ?

Nous serons capables d'effectuer des mouvements connus avec davantage d'aisance et nous pourrons déplacer des charges plus conséquentes. Les auteurs se font plaisir avec différentes terminologies :

- Force maximale concentrique : mise en action du plus grand nombre d'unités contractiles (sarcomère) au sein du même muscle afin de produire la plus grande tension permettant le rapprochement des insertions musculaire.
- Force maximale isométrique : mise en action du plus grand nombre d'unités contractiles (sarcomères) au sein du même muscle afin de produire la plus grande tension statique.
- Force maximale excentrique : plus grande tension musculaire que le muscle peut subir avant sa rupture lors de son allongement.

Certains se perdent un peu avec la notion de force maximale volontaire. Lorsqu'une barre est chargée au-dessus du maximum connu ou qu'un saut est effectué d'une hauteur de 2 m, l'effort fourni semble bien volontaire même si des mécanismes réflexes peuvent se mettre en action.

Les forces absolues et relatives sont encore des moyens de se perdre dans de la terminologie.

Nous retiendrons celle-ci au final :

Force maximale musculaire (FMM) : moyen mis en jeu par le muscle pour offrir la plus grande tension myotendideuse possible. (Cela passe par la contraction musculaire, la mise en jeu des structures élastiques du muscle, le système neuroendocrinien,... comme évoqué plus haut).

En ce qui nous concerne, d'un point de vue pratique, seule la classification de force illustrée ci-dessous nous intéresse :

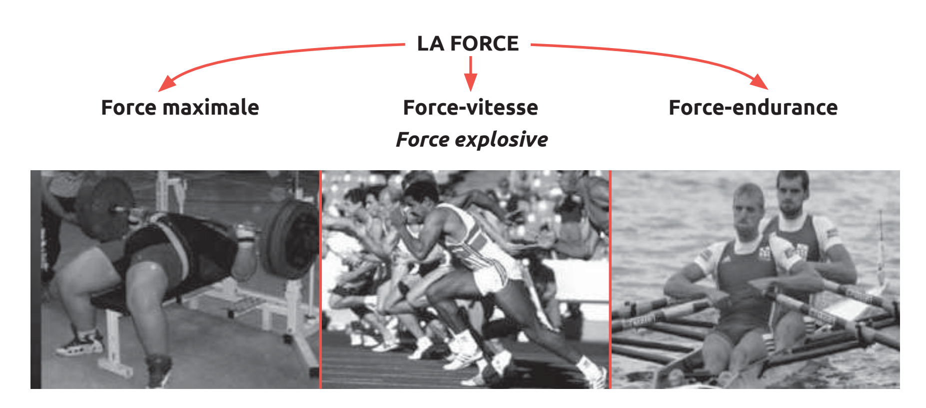
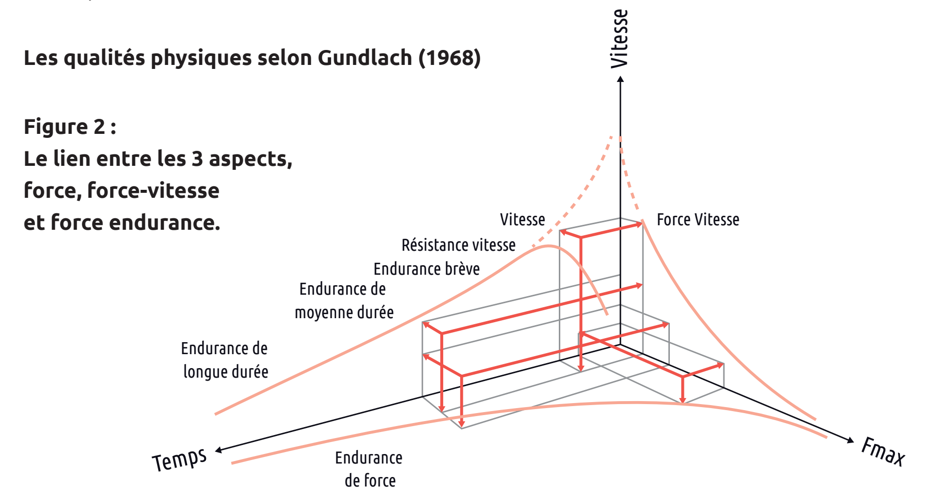


Figure 1 : Les trois types de force.

Nous voulons acquérir de la force pour être plus fort, produire de la vitesse ou durer dans le temps. Le rugbyman a besoin de résister à la poussée de l'équipe adversaire, le boxeur d'asséner un cou puissant et le compétiteur d'aviron veut produire de la force qui dure.
La classification des qualités physiques peut se représenter avec ses 3 aspects. Passez du temps devant la figure 2, vous serez étonné de ce que nous pouvons en déduire.



Les qualités physiques selon Gundlach (1968)

Figure 2 :
Le lien entre les 3 aspects, force, force-vitesse et force endurance.

Historique

Si votre discipline sportive est uniquement basée sur la force (Force athlétique ou Power lifting), vous devenez donc un spécialiste de cette qualité et vous la pratiquez toute l'année. Dans les autres disciplines, vous hésitez parfois à la développer par crainte de perdre en vitesse et en souplesse. Craintes effectivement connues… mais non justifiées.
Un petit historique pour nous rappeler ce que nous savons déjà depuis longtemps. Entre une pratique spécifique de la musculation et une pratique populaire, bien des étapes discrètes ont vu le jour sans que nous ayons pu les répertorier.

- Internet est né en 1969, sous une autre forme que celle que nous lui connaissons, pour le ministère de la défense Américaine ; sa forme populaire fut créée en 1990.
- Les médias ont commencé à en parler en 1994.

Il aurait été pratique qu'Internet soit né en même temps que l'Humanité pour suivre son évolution.
La musculation a sans doute suivi une trame identique : créée pour notre propre défense, améliorée dans son approche puis popularisée pour un plus large public.
Il est évident que l'entraînement au combat est sûrement une des premières origines de l'entraînement en musculation, sans aucun doute à orientation FORCE. Les guerriers de l'histoire (Romains, Grecques…) et les gladiateurs ont utilisé des méthodes permettant une amélioration de leur potentiel physique. N'oublions pas également l'origine des arts martiaux dans les peuplades asiatiques…

Les jeux Olympiques apparus en –776 avant J.-C. ont une histoire qui aurait commencé en Grèce, dans le Péloponnèse (partie méridionale de la Grèce reliée à la Grèce centrale), il y a 3000 ans environ. Lanceurs de javelot, lutteurs et autres athlètes utilisaient déjà des poids et des haltères. Durant toute une période, nous avons eu peu d'informations permettant

de suivre l'évolution des différents entraînements, mais en ce qui concerne la musculation, il faut attendre le début des années 1800 pour retrouver une évolution significative.

- Dans les années 1840, aux USA, les hommes forts faisaient de leurs démonstrations une attraction dans les cirques de foire.
- Vers 1885 : l'évaluation de la force devient plus courante chez les militaires.
- 1897 à Harvard ; épreuves de force (dos, poitrine, bras, jambes...) avec les instruments de mesure de l'époque.
- 1897-1899 : classements des différentes écoles : Harvard, Columbia, Amherst, Minnesota et Dickinson.
- Début 1900 : l'évaluation de la force était monnaie courante (culturistes, haltérophiles, lanceurs et lutteurs).
- Les autres athlètes n'osaient pas faire de force par peur de perdre vitesse et amplitude articulaire. Peur de "nouer leurs muscles".
- Ce mythe disparut entre 1950 et 1960 où l'on observa l'inverse. Haltérophiles et culturistes présentaient d'excellentes qualités de vitesse. (Ce mythe décrit par les ouvrages de physiologie n'a pourtant pas disparu).

Aujourd'hui, trois disciplines sportives concernent la pratique de la musculation :
- le culturisme ;
- la force athlétique ;
- l'haltérophilie.

Les techniques d'entraînement basées sur la force proviennent principalement des pays de l'Est tandis que les techniques basées sur l'endurance proviennent des États-Unis.
Même dans les activités physiques, la guerre froide avait lieu...

De cet aspect endurance, une autre forme de pratique a vu le jour en parallèle de ces disciplines sportives orientées uniquement sur la force : il s'agit du Fitness (forme).

- Le fameux test de Cooper (courir la plus grande distance en 12 minutes) est le fruit du travail de Kenneth Cooper, lieutenant-colonel dans l'US Army, qui développe et défend le bénéfice des activités physiques à dominante cardio-vasculaire à la fin des années 60 (1968).
- La médiatisation se fait dans les années 70 par Jane Fonda.
- Dans les années 80, Véronique et Davina popularisent le Fitness avec l'émission "Gym Tonic". Bien qu'injustement critiquées aujourd'hui, elles ont su rendre la pratique accessible à tous. Rendons hommage aux précurseurs et ne tirons pas sur les messagers !
- Dans les années 90, le B.T.S. (Body Training System) fait son apparition.

L'évolution de la musculation et du Fitness a permis de voir l'émergence des salles de remise en forme, qu'elles soient associatives ou du secteur marchand. La musculation s'est développée grâce au développement du fitness, ne lui retirons pas ce bénéfice.

Pourquoi développer la force ?
Qu'avons-nous à y gagner ?

La musculation est pratiquée pour différentes raisons : bien-être, réhabilitation, préparation physique et évidemment sports de force.

En voici ses bénéfices :
- améliorer son explosivité sur 10 m et 30 m (important pour les sports collectifs) (104) ;
- améliorer de 5 à 15 % l'économie de course (endurance) (45, 79) ;
- améliorer la puissance aérobie d'un joueur sur 4-8 min (sports collectifs) (42) ;
- améliorer la stabilité de certaines articulations (genou) ;
- améliorer la puissance de frappe des sports de frappe ;
- rôle prophylactique (traitement préventif) ;
- vitesse et fréquence du geste (l'alternance d'un geste demande une force de freinage importante) ;
- résistance musculaire locale (meilleur fonctionnement enzymatique) ;

- coordination des mouvements (Paradoxe de lombard, (58, 59)) ;
- amélioration de la capacité de décontraction (liée au calcium) ;
- amélioration de la coordination intra et intermusculaire ;
- augmentation de l´élasticité des muscles (raideur musculaire augmentée).

Lutter contre l'ostéoporose

L'ostéoporose est une perte de densité minérale osseuse, perte des ions calciques, l'os devient plus fragile. La stratégie a été longtemps d'augmenter les apports de calcium, puis de vitamine D, aujourd'hui la vitamine K et le fluor. Stratégies pas toujours payantes.

Pour exemple, un tennisman a les os du bras dominant plus denses, un coureur possède des membres inférieurs et un rachis plus denses, un nageur l'inverse.

On peut en déduire que les chocs ou la musculation sont efficaces car les deux augmentent la contrainte mécanique imprimée par le muscle sur l'os. Un os "déformé" par l'activité va chercher à se renforcer.

Rapport INSERM (2008) :
Pour préserver son capital osseux, choisir de préférence des activités dites "avec mise en charge".
Seuls les exercices avec mise en charge (course à pied, musculation, marche à bon rythme, montée d'escaliers) ont pu faire la preuve de leur efficacité.

Les exercices qui n'impliquent pas de mise en charge (natation, cyclisme) sont peu ou pas efficaces : la densité minérale osseuse est 20 à 33 % plus élevée, selon les sites osseux, chez des gymnastes comparées à des nageuses et un groupe témoin.

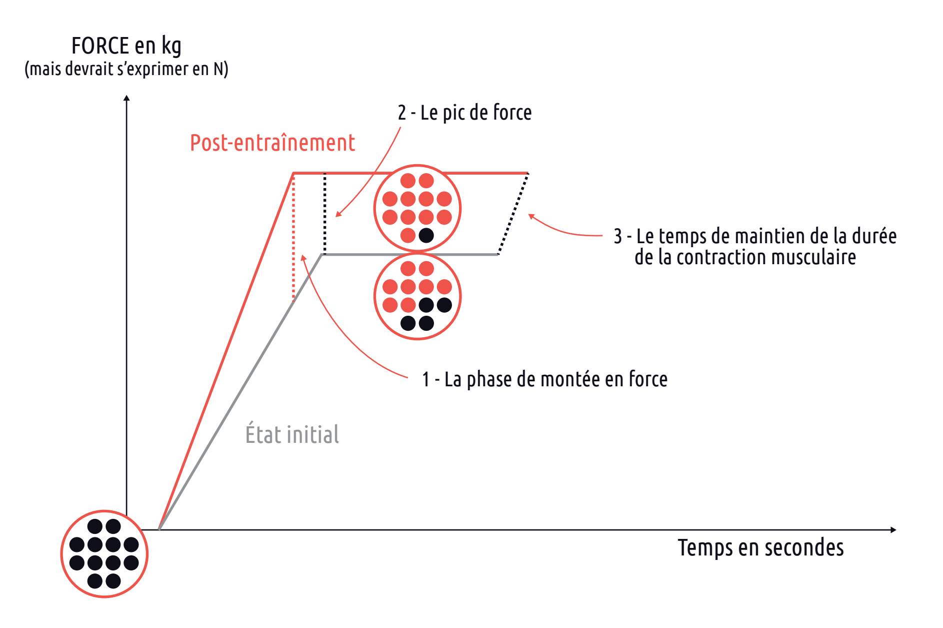


Figure 3 : La force va augmenter la vitesse à laquelle on développe notre force maximale, la valeur de cette force maximale et la durée de maintien de notre force. Nous retrouvons les 3 aspects de la force "utile" sur le terrain. Le cercle représente schématiquement le muscle. Inactif dans un premier temps, il fait travailler ses fibres internes ; à la suite de l'entraînement, il est capable d'en faire travailler davantage.

La force chez les coureurs d'endurance. (Voir les excellents rapports de Bruno Gajer sur ce sujet).

Il existe un besoin de force à des fins "détournées" : le coureur d'endurance a besoin d'une qualité musculaire élastique que la musculation lourde peut lui apporter. Il peut supporter de 1,5 à 3 fois le poids de corps selon sa vitesse de course. Ses besoins de force : il se propulse (appui unipodal), il a donc besoin de muscles raides (ressorts forts) afin de gagner en économie de course ; il doit être gaîné afin d'exprimer au mieux la transmission des forces et reculer son seuil de fatigue (la force améliore les transferts de calcium...).

	Phase d'appui		Phase de retour	
Articulation	Muscles	Type de contraction	Muscles	Types de contraction
Hanche	Extenseurs Grands fessiers Ischio-jambiers	Concentrique	Fléchisseurs Psoas Extenseurs Grand fessier Ischio-jambiers	Concentrique et Excentrique et concentrique
Genou	Extenseurs Quadriceps	Stato-dynamique	Fléchisseurs Ischio-jambiers Extenseurs Quadriceps	Concentrique-excentrique et concentrique Concentrique
Cheville	Extenseurs Gastrocnémiens Soléaire	Pliométrique	Fléchisseurs Tibial antérieur	Concentrique
Pied	Fléchisseurs	Pliométrique		
Temps de contacts	130 à 200 ms			

Les programmes des coureurs d'endurance sont composés de 10 % du temps total à la musculation pour le 5000 et 10000 m, 15 % pour le 1500 m et 20 % pour le 800 m. Les programmes démontrent des entraînements basés sur l'explosivité, les contrastes de charges, du travail à 90 % de la RM, nous sommes loin du travail léger en série longue (qui n'apporte rien). Nous sommes toujours étonné de voir qu'il y ait encore des personnes qui pensent que la musculation ne sert à rien pour le marathonien ou les autres coureurs. Nous avons même dû défendre en vain un candidat lors d'un examen (l'incompétence et la mauvaise foi régnaient ce jour-là). Nous constatons que les grands entraîneurs font de la musculation lorsque les autres en cherchent l'intérêt.

Utilité et importance de l'échauffement pour le travail de force

Toute séance d'activité physique et sportive débute par un échauffement, il suffit de suivre un match de rugby ou de football à la télévision pour faire ce constat.

Nous constatons diverses pratiques dans l'échauffement en musculation. Une partie commence par du cardiotraining, puis continue par des mouvements avec un bâton, avant de commencer un autre échauffement en musculation spécifique. Nous sommes en mesure de nous demander si l'échauffement de 10 minutes sur appareil a été efficace ?

Quels sont les objectifs de l'échauffement ?

L'échauffement prépare l'organisme à effectuer un effort dépassant son rythme de base, les sous-objectifs sont de préparer les articulations, les muscles et les transports d'énergies afin d'éviter les blessures et d'optimiser la séance.

Si nous ne chauffons pas les os de l'articulation pour pratiquer une activité physique, alors que devons-nous préparer ? Principalement les cartilages qui ne sont pas vascularisé et qui se nourrissent à partir du liquide synovial dans lequel ils prennent tous les nutriments nécessaires. Mais pour que ceux-ci optimisent leur préparation, il faut les solliciter avec une légère charge car nous pouvons les considérer comme une éponge que nous voudrions mouiller complètement. Il faut appuyer sur cette éponge plusieurs fois. Les cartilages ont besoin de cycle compression-décompression pour se nourrir. Faire des mouvements de bras à vide est insuffisant : il faut avoir une légère surcharge dans la main pour stimuler les cartilages au niveau de l'épaule (par exemple).

La synovie, pour ne pas être en "manque", doit être produite par la capsule articulaire (celle-ci entoure l'articulation) ; les grandes amplitudes permettent de stimuler la capsule et de lui faire sécréter la synovie.
En ce qui concerne les muscles, sachez que 3 à 5 minutes suffisent pour augmenter la température alors qu'il en faut au moins 15 (sinon plus) pour augmenter de 1 degré la température de l'ensemble du corps.
Nous pouvons déjà nous demander l'utilité de faire 10 minutes de vélo, c'est trop pour le muscle et pas assez pour le corps.

Est-ce intéressant d'augmenter la température des muscles ?

Oui, sans aucun doute. Il existe des notions compliquées de biomécanique qui étudient le fonctionnement du muscle dans plusieurs conditions. Nous pouvons en garder que l'augmentation de la température permet aux muscles d'être plus viscoélastiques, ils peuvent être étirés plus rapidement en diminuant le risque de se rompre partiellement (blessure). Ils sont également plus rentables, les réactions chimiques se font plus rapidement. Enfin, les informations nerveuses se transmettent plus vite.
Il est instructif de constater que de nombreux champions dans les sports de force ne pratiquent pas d'échauffement sur vélo ou appareils de cardiotraining. En effet, le poids des barres étant élevé, il leur faut parfois 15 à 20 minutes de montée progressive des charges avant d'atteindre leurs barres d'entraînement. L'échauffement est ainsi inclus dans cette progressivité. Que font les personnes pratiquant du cardiotraining juste après la musculation, sont-ils prêts pour une barre à 120 kilogrammes ? Non, ils reprennent un échauffement spécifique en musculation.

Conclusion :

- Préparer les cartilages et la sécrétion de synovie sera obtenu par des mouvements en amplitude de plus en plus grands des articulations. Les exercices qui peuvent paraître stéréotypés avec les bâtons sont pourtant un bon moyen de réussir à stimuler la capsule articulaire et de lui faire sécréter cette synovie. On terminera avec une mise en compression par quelques mouvements sur appuis ou de compression articulaire.
- Prendre un poids de 1 à 2 kilos dans la main et effectuer des rotations pourrait permettre aux cartilages de se préparer à la suite de la séance.
- Si la température est basse ou pour ceux qui ont toujours eu l'habitude de faire du cardiotraining, sachez que le système de transport de l'oxygène demande 2 à 4 minutes pour se mettre en cours. Nous conseillons de faire 5 minutes maximum de cardiotraining à intensité moyenne.
- L'augmentation de la charge doit être progressive, d'une barre à vide avec des mouvements de 10 répétitions, augmentez de 5 kilos ou de 10 en fonction de votre performance avec une récupération maximale d'une

minute. Lorsque vous avez dépassé 50 % de votre charge maximale, 5 répétitions par augmentation permettront de ne pas vous épuiser.
- Des étirements légers et courts permettront également de préparer les tendons (comme les cartilages) à la suite de la séance.

15 minutes devraient être un bon temps à consacrer à votre échauffement. L'organisme est sollicité durant la musculation, ne sous-estimez pas l'échauffement. Pour information et pour faire prendre conscience de l'intensité de certaines séances, voici une courbe de fréquence cardiaque obtenue durant une séance de 4 séries de 10 répétitions maximales (10 RM à 75 %) sur un exercice du squat (figure 4).

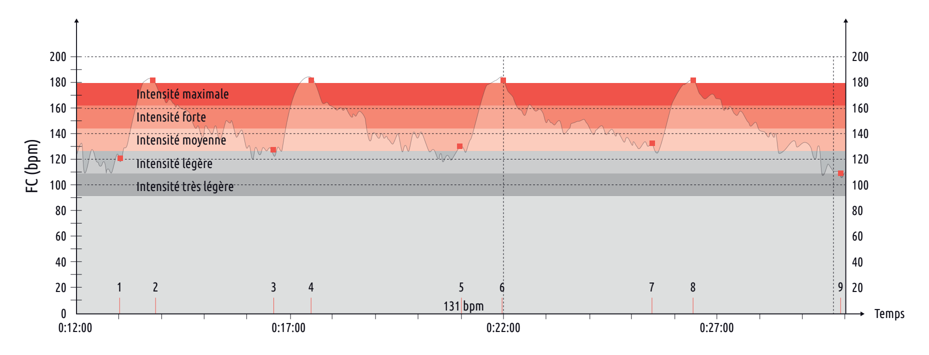


Figure 4 : Quatre séries de 10 RM, les valeurs obtenues sont de 183 battements par minute jusqu'à 185. Le système cardiaque est sollicité à hauteur de 65 % du $\dot{V}O_2$max. Les carrés rouges marquent le début et la fin de la série.

Pourquoi gagnons-nous en force sans prendre de masse musculaire ?

Le début d'un programme de musculation est assez surprenant : vous voyez votre force augmenter sans changement de votre physique. Comme toutes les activités, c'est encore votre système nerveux qui permet ces changements (ou vous limite initialement). Par l'énervement (la motivation), nous débloquons des sécurités afin d'exprimer le potentiel musculaire. L'entraînement de la force fonctionne sur ce principe : nous débloquons doucement les sécurités et améliorons la qualité musculaire afin de supporter la régularité des tensions développées. Vous pouvez prati-

quer la force sans jamais prendre de masse musculaire ; il existe des disciplines dont les compétitions sont liées au poids de corps. Certains peuvent concourir 10 ans sans changer de poids. Et pourtant, dans les salles de remise en forme, combien de pratiquants ne veulent pas mettre lourd par crainte de voir grossir le muscle. Ils ont de la marge…

En terme plus scientifique, lorsque le muscle améliore sa coordination intramusculaire (capacité à produire davantage de force nerveusement), nous parlons de sa capacité à recruter et synchroniser des unités motrices. Une unité motrice est le neurone moteur et toutes les fibres musculaires qu'il innerve. Un interrupteur de lumière d'une pièce est la commande nerveuse (le neurone) et les 10 néons qui s'allument le résultat (ici les fibres musculaires qui se contractent). Un neurone peut commander 3 000 fibres. La pratique de la musculation permet une optimisation du nombre d'unités motrices recrutées.
Lorsque la technique est votre facteur limitant, comme un mouvement peu fluide au squat, nous parlons de la coordination intermusculaire (ordre passé entre les différents muscles).

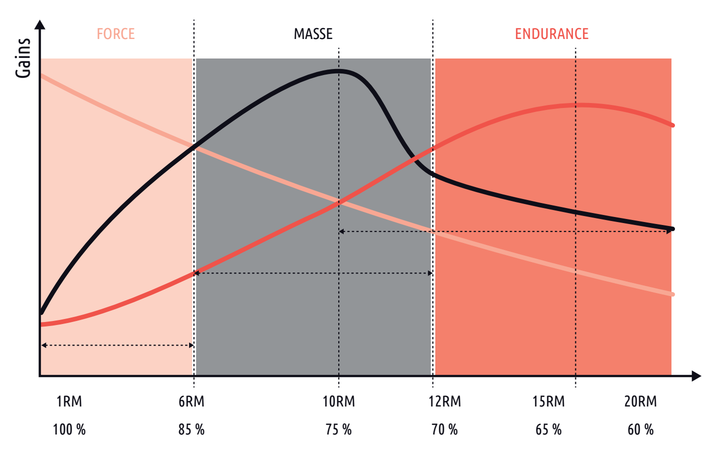


Tableau 1 : Il devrait aider à comprendre que toutes les méthodes font gagner en force, que toutes les qualités sont développées par la musculation, seule une dominante peut ressortir d'un travail particulier bien que pour la masse musculaire, nous verrons plus loin qu'un travail en série longue peut s'avérer aussi efficace qu'un travail à 10 RM.

Objectif	% du maximum	Nombre de répétitions	Nombre de séries	Vitesse	Temps de récupération
Force excentrique	120 %	3	1	Vitesse négative	-
Force isométrique	110 %	3	3	Nulle	3 minutes
Force maximale	100 %	1	3	basse	3 minutes
Force submaximale	85 à 97 %	6 à 2	3	basse	3 minutes
Hypertrophie Puissance force	70 à 85 % 60 à 70 %	12 à 6 6	6 à 10 3 à 5	basse "Rapide"	<3 minutes 3 minutes
Puissance maximale	45 à 60 %	6	4 à 6	rapide	3 minutes
Endurance	45 à 60 %	> 15	3	Moyenne	2 minutes
Puissance vitesse	30 à 45 %	6	3	rapide	3 minutes
Vitesse	20 à 30 %	6	3	maximale	2 minutes
Explosivité (jeter)	< 30 %	6	3	Maximale	2 minutes

Tableau 2 : Tableau général des méthodes en fonction de l'objectif et % du maximum associé.

La musculation chez les jeunes



Lehen Reiss, 11 mois et déjà de la musculation en évitant le conflit sous-acromial (humour).

La musculation a, comme la gymnastique, mauvaise presse. Nous pouvons entendre que ces deux disciplines stoppent la croissance, empêchent les enfants de grandir...

Pourquoi ?

Tout d'abord, la musculation n'est pas *synonyme* d'un développement exagéré du volume musculaire (ou hypertrophie musculaire). Une disci-

pline (le culturisme) a en effet cet objectif esthétique, mais la musculation est bien plus large que cette unique vision populaire. La musculation vise le développement de la force, de l'endurance musculaire, de la structure corporelle (renforcement des os, des muscles…) (14, 36, 37, 48). ***Un muscle entraîné est plus résistant*** au niveau de ses enveloppes (fascia, aponévrose…) et tendons (le tissu conjonctif est plus résistant), il se blesse moins.
Si le terme de "musculation" déplaît, nous pouvons lui préférer celui de *renforcement musculaire.*

En ce qui concerne la gymnastique (proche de la musculation), un congrès de la Société Française de Traumatologie du Sport (Rennes, 2002) a regroupé les revues de littérature sur le sujet. Il est dit que la discipline choisit comme par sélection naturelle les personnes de plus petite taille (dont les parents étaient également petits). Vous auriez pu mettre ces enfants au basket, ils n'auraient pas été plus grands.
Seule la pratique sportive de haut niveau intensive de plus de 20 heures par semaine est à surveiller par une équipe médicale. En dessous, vigilance et bon sens sont de rigueur.
En ce qui concerne la musculation, plusieurs revues de littérature permettent de statuer sur un danger potentiel de la musculation chez les jeunes.
Avant de répondre à cette question, analysons de manière neutre et objective le choix d'une discipline pour un jeune. Les parents inscrivent-ils leurs enfants lorsque ceux-ci demandent une pratique particulière ou est-ce qu'ils les inscrivent à ce qu'ils aimeraient qu'ils fassent ?

Cela dépend de leur autorité et de leur souplesse…

Si l'enfant demande à faire de la musculation, pourquoi l'en empêcher ? Avec quel argument ? Pour protéger sa croissance alors que la musculation stimule l'hormone de croissance, celle qui est justement sécrétée lors de la puberté ?

Les statistiques des assurances sont sûrement les plus objectives en ce qui concerne les accidents sportifs. Il n'est pas dans notre objectif de décrédibiliser ici des disciplines sportives. Ce que nous pouvons affirmer, c'est que

la pratique de la musculation n'arrive pas en tête du classement des sports occasionnant le plus d'accidents. Un rapport du conseil de médecine du sport du Québec (CMSQ) sur l'entraînement en force chez les jeunes démontre qu'il y a bien eu des accidents, mais dans des cas précis : charges excessives (davantage au-dessus de la tête) et manque de supervision. Les conclusions restaient extrêmement favorables à la pratique de la musculation. Nous allons y revenir.

Ce qu'on pensait avant les années 80

La pensée dominante avant 1980 a été largement influencée par des auteurs comme Vrijens (99) pour qui les préadolescents (enfants) sont peu adaptés au niveau anatomique et physiologique aux contraintes mécaniques imposées et incapables d'avoir une augmentation de force musculaire. Selon ces mêmes auteurs, le contexte hormonal est défavorable au développement de cette force musculaire puisqu'il ne peut y avoir d'hypertrophie en l'absence de testostérone. L'augmentation de la force chez les prépubères est donc impossible. Mais cette position n'a pas tenu longtemps face aux résultats obtenus par de nombreux laboratoires dès les années 80 (9).

Ce qu'on sait aujourd'hui

À ce jour, il existe plus de 250 études publiées sur l'impact du renforcement musculaire sous différentes formes de travail, à différents âges (enfants et adolescents) et selon le sexe (garçon et filles). Toutes n'ont pas la qualité attendue d'un article scientifique digne de ce nom, mais elles restent intéressantes pour explorer les relations entre développement, maturation, renforcement musculaire, performance sportive et bénéfices pour la santé.

Une activité à part entière

Il faut encore une fois analyser les pratiques sportives. Dans de nombreuses disciplines, le renforcement musculaire fait partie intégrante de

l'entraînement sous des formes différentes : pompes (avec un gainage parfois inexistant), flexions sur une jambe (ce qui est démentiel pour certains), saut d'un banc (sans technique de réception et étant négatif pour les genoux)...
La musculation a plusieurs avantages (4, 19, 30, 38, 70, 82) :
- elle est le plus souvent symétrique ;
- elle apporte un gainage bénéfique pour la pratique des autres disciplines ;
- elle permet d'éviter les blessures si elle est bien encadrée.

En revanche, si la musculation devait être l'unique pratique de votre enfant, nous aurions tendance à dire également qu'il y a un manque de coordination multiple contrairement à ce que l'on rencontre dans d'autres formes de motricité comme courir, sauter, développer son adresse. Elle est également peu ludique par rapport à un sport collectif.

Une "mauvaise" réputation par une mauvaise gestion

L'idée reçue que la musculation est mauvaise pour les jeunes concerne des accidents provoqués par une pratique abusive de celle-ci entraînant des blessures rares comme les ostéochondroses (atteintes du cartilage de croissance) ou les avulsions (arrachement du cartilage de croissance). La plupart du temps, elles pourraient être évitées si les entraîneurs avaient une meilleure connaissance du public qu'ils encadrent et des effets du développement sur l'organisme (75, 76, 80, 98).

Zone touchée	Maladie de
Astragale, tête de métatarsiens	Freiberg
Calcanéum	Sever
Coude	Panner
Hanche	Legg-Perthes-Calvé
Poignet	Kienbock
Rotule	König
Scaphoïde tarsien	Köhler-Mouchet
Sésamoïde de premier orteil	Renander
Tibia	Osgood-Schlatter
Vertèbres dorso-lombaires	Scheuermann

Tableau 3 : Noms et localisations des avulsions les plus courantes.

Une activité physique essentielle à tout âge…

La réalité nous indique que la musculation peut être complémentaire à de nombreuses disciplines sportives et même prévenir certaines formes de blessures, y compris à l'âge adulte (23, 31-35, 38, 77, 86).
Nous préférons que le jeune se prépare physiquement à la pratique du ski ou du rugby que de le voir sans gainage faire des mouvements risqués. L'encadrement dans toute discipline est obligatoire. La pratique de mouvements au poids de corps peut précéder l'utilisation de charges légères, pour évoluer avec le temps vers des charges plus importantes et adaptées. C'est l'entraîneur qui devra gérer avec ses connaissances la charge correspondant aux attentes du jeune athlète. Le renforcement musculaire peut se faire dès l'âge de 5 ans (29) et la 1RM peut être évaluée sans aucun risque chez les prépubères lorsque les superviseurs sont bien formés (25). Chez les enfants prépubères, la majorité des effets sur la force maximale et l'endurance de force ont lieu grâce à des adaptations nerveuses (20, 81, 83, 84, 96, 97, 103, 105). La contrepartie de cette amélioration de la force par un meilleur recrutement des unités motrices, notamment de type II, est que l'enfant entraîné grâce au renforcement musculaire verra son endurance musculaire diminuer par rapport à un enfant non-entraîné (8, 40, 41). Un autre facteur contribue à l'amélioration de la force et de la puissance musculaire au cours de la maturation : c'est l'augmentation de la raideur des tendons par un changement de nature du collagène, et ce, indépendamment du changement de masse musculaire qui se produit pendant la même période sous l'influence de l'hormone de croissance et des hormones androgènes (54-56). C'est donc au cours de la puberté que le jeune acquiert la capacité à tirer avantage de l'élasticité de ses tendons, pendant les sauts par exemple. Cependant, il est possible d'obtenir ces effets plus tôt grâce à un entraînement pliométrique bien dosé (15, 16, 49, 62, 64, 71-73, 87, 88).

… Si on utilise des charges adaptées

La force peut se développer longtemps sans qu'il y ait un besoin de charges excessives. La plupart des protocoles vont de 1 à 3 séries pour une inten-

sité allant de 60 à 80 % de la 1RM (4, 7, 30, 82). Pour autant, il est possible d'utiliser des charges lourdes chez des enfants de 7 à 12 ans (22, 28, 29) à la condition de coupler cette intensité de travail à un travail de type explosif sur le même membre dans la même séquence de travail : par exemple, 1 x 6RM en développé-couché suivi par 1 x 6 lancers de médecine-ball de 2 kg (22), ce qui correspond à la méthode Bulgare ou méthode des contrastes de charges (Figure 5). On obtient des gains similaires avec des charges modérées car l'enfant améliore aussi ses performances par la répétition du geste. Cependant, si le renforcement musculaire se fait dans le cadre d'une pratique sportive, il convient de choisir la forme et l'intensité qui seront les plus proches de celles rencontrées en compétition ; on se placera généralement à 15-18 sur l'échelle analogique visuelle de Borg allant de 6 à 20 (5).

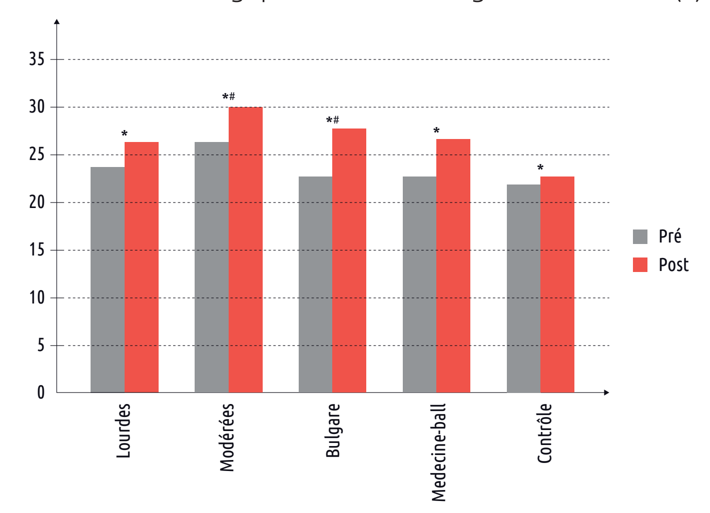


Figure 5 : Effets de diverses formes d'entraînement sur la 1RM chez des enfants. Lourdes = 6-8 RM. Modérées = 13-15 RM. Bulgare = 6 RM + 6 médecine-ball. * = Augmentation entre pré et post-entraînement. # = Augmentation significative par rapport au groupe contrôle. C'est-à-dire effet de l'entraînement obtenu en plus de la maturation. D'après Faigenbaum (22).

La bonne dose

La fréquence d'entraînement (2 à 3 x / sem) et le nombre de séries (1 à 3 séries) sont généralement plus élevés pour le haut du corps que pour le bas du corps (respectivement 1 à 2 x /sem et 1 à 2 séries) (4, 19, 24, 28, 74).

Prévenir

Il est important de rester attentif aux douleurs que pourraient signaler les enfants et surtout les adolescents, qu'ils soient ou non engagés dans un programme de renforcement musculaire. En effet, tout entraînement ajoute des contraintes supplémentaires à celles du développement. Des douleurs récurrentes aux points d'insertion des tendons, qui plus est quand ils sont attachés sur une zone de cartilage de croissance, doivent alerter l'entraîneur comme les parents d'un éventuel stress tissulaire imposé au niveau de cette zone de jonction. Surtout si ces douleurs apparaissent pendant la phase d'augmentation de la croissance en taille du sujet (pic de croissance, figure 6). Il a été démontré que *c'est durant les phases de changement interne rapides qu'un tissu est le plus fragile* (Loi de Mark Jansen cité par Jürgen Weineck (101) p. 312). La datation de l'âge squelettique aidera à savoir le niveau de développement et de maturation à l'aide d'une radiographie du poignet, grandement facilitée par l'usage de l'informatique (90-93).

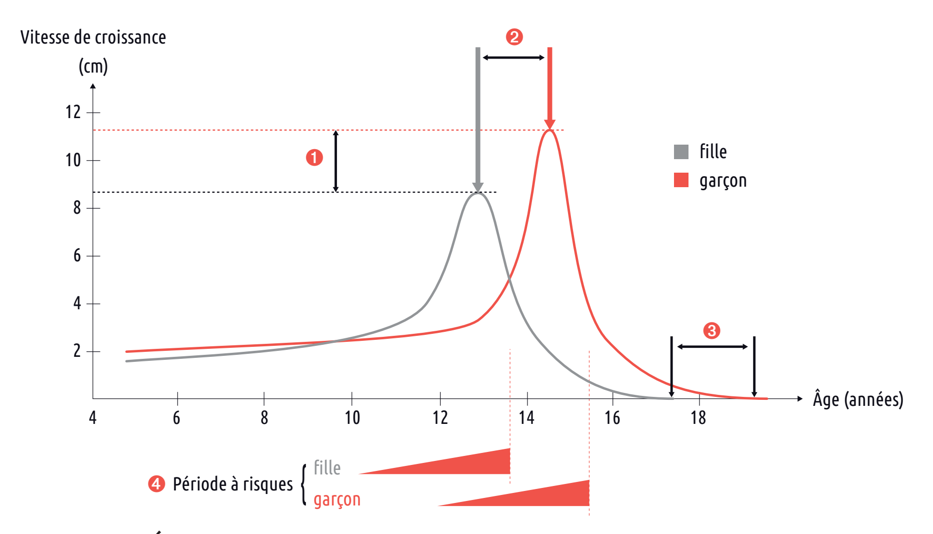


Figure 6 : Évolution de la vitesse de croissance en taille (cm/an) chez les filles et les garçons. On note ❶ la différence d'intensité entre les 2 pics de croissance : précocité du pic de croissance chez les filles ; ❷ le décalage du pic de croissance ; ❸ le décalage du moment de maturité maximale (taille adulte) ; et ❹ la différence entre les périodes de fragilité entre les 2 sexes.

Comparé à l'adulte, l'enfant et l'adolescent ont de très grandes capacités de récupération (27) puisque 1 à 2 minutes suffisent entre les séries. Cependant, une mauvaise gestion de l'intensité de la contrainte imposée au squelette (via la pliométrie ou la charge soulevée) ou du nombre de répétitions peut provoquer des fractures ou avulsions du cartilage pendant cette période de fragilité. La vigilance s'impose et l'écoute est de rigueur.

Conclusion

Les protocoles d'entraînement avec charges libres et charge guidée supervisés par un instructeur compétent et formé pour ce type de public, avec un faible ratio de sujets, sont relativement sûrs et n'ont pas d'impact négatif sur la croissance et la maturation des jeunes prépubères et des jeunes physiquement précoces (3, 19, 21, 26, 39, 61, 89).

Évaluer son maximum (sa RM ou RM1 ou 1-RM ; répétition maximale)

Évaluer de manière directe

Évaluer son maximum permet de se donner une valeur de travail, comme la VAM donne un repère pour travailler l'endurance.
Il n'est pas question de se lancer dans l'évaluation sans respecter la progression classique.
En premier, l'acquisition technique (apprentissage moteur) reste la priorité. Dès que les mouvements sont fluides, vous pouvez passer à l'augmentation de la charge. **Pas plus de 5%-7% d'une séance à l'autre ni plus de 15 % d'une semaine sur l'autre** si vous conservez le même nombre de répétitions lorsque vous êtes débutant. (Vous aviez 40 kg pour faire 10 répétitions lundi, jeudi vous tentez davantage, une augmentation de 7 % arrondi nécessite 42,5 kg).
Afin de trouver votre maximum ou votre RM1 (répétition maximale en une fois) possible entre votre première journée et cet instant, nous vous conseillons **au moins 6 semaines de pratique à raison de 2 fois par semaine minimum.** Vous ne devez plus être débutant.

Quel niveau de pratique ?

- Le néophyte/novice découvre la musculation (première journée), il n'y connaît rien, il passe très vite débutant en cherchant une gestuelle adaptée (4 semaines).
- L'intermédiaire pratique 6 mois avec assiduité.
- L'entraîné pratique durant 2 ans.
- L'avancé connaît des performances intéressantes.
- L'élite fait de la compétition.

Le protocole suivant (Figure 7) nous semble le plus efficient : c'est celui qui trouve un compromis entre une fatigue limitée par la montée des charges et la réalisation de son maximum en étant échauffé.

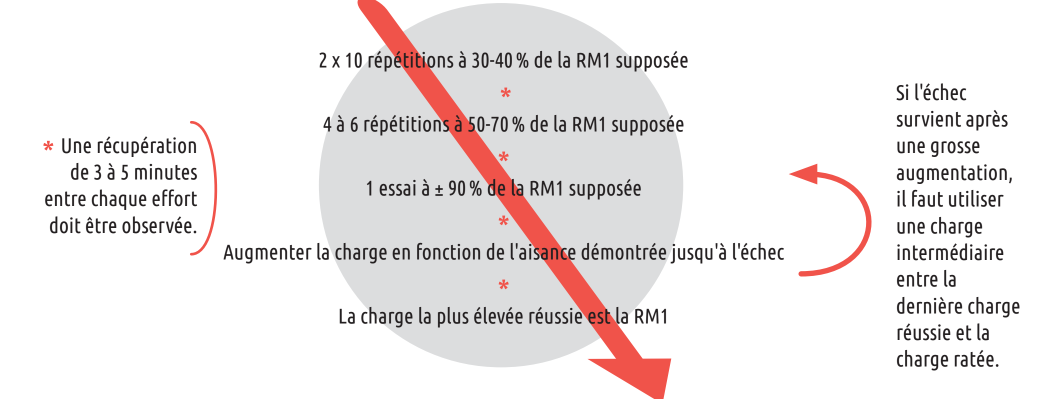


Figure 7 : Protocole d'évaluation de la 1RM

La RM1 supposée :
Nous devons chercher notre maximum en estimant un maximum théorique. Sans explications, cela peut laisser perplexe. Durant vos 6 semaines d'entraînement, vous avez certainement vécu une situation comme étant la plus difficile. Par exemple : "J'ai déjà soulevé 6 fois 50 kg il y a 3 jours."
Nous pouvons déduire la RM1 par extrapolation (Tableau 8, page 322 ; explication page 309). D'après le tableau, 6 répétitions à 50 kg donnent 60 kg.

Ayant déjà vécu la situation des 6 répétitions, le tableau de prédiction me dit que je devrais soulever une fois 60 kg. C'est donc ma **RM1 théorique.**

Je construis mon protocole :

Échauffement ostéoarticulaire (préparer la lubrification des articulations) puis faire des barres à vide (15 répétitions).

Protocole	Charges correspondantes
10 répétitions à 30 % de la RM 1 supposée	30 % de 60 = barre chargée à 20 kg (prenons la barre de 20kg)
3 min de repos	
10 répétitions à 40 % de la RM 1 supposée	40 % de 60 = barre chargée à 24 kg
3 minutes de repos	
4 répétitions à 60 % de la RM 1 supposée	60 % de 60 = barre chargée à 36 kg
3 minutes de repos	
1 essai à 90 % de la RM 1 supposée	90 % de 60 = barre chargée à 54 kg
3 minutes de repos	
Selon l'aisance, prendre le 100 % théorique ou prendre au-dessus	100 % de 60 = barre chargée à 60 kg
1 essai à 100%	
5 minutes de repos	
Test avec 5 kg de plus 1 essai recherche	Barre chargée à 65 kg
Échec, prendre 5 minutes de repos et prendre une charge intermédiaire.	
1 essai à 62.5 kg	
Réussite, c'est votre RM 1	La RM 1 varie en fonction de l'état de forme, la période de la journée, votre entraînement. Il faudra la rechercher "régulièrement" si vous tenez à cette valeur.

Tableau 4

En ce qui concerne les tests indirects cités plus haut, indiquant de se servir d'un nombre de répétitions effectuées au-dessus de 4 et d'en déduire un maximum possible, nous pensons qu'ils ne sont utiles que pour la recherche

de la RM 1 supposée afin d'en appliquer le protocole de la recherche de la RM, ou en cas d'impossibilité de chercher la RM directement (arthrose, hypertension artérielle...). De très nombreuses formules existent, nous n'en démontrons que quelques-unes dans le tableau suivant, à savoir que le tableau de Brzycki est le plus connu et pourtant pas le plus fiable.

Les femmes étant plus endurantes que les hommes, il était facile de se tromper sur la prédiction réelle de leurs maxi avec cette formule. Un spécialiste de l'aviron se verra surévalué grâce à sa grande résistance aux efforts intenses. Il existe une formule pour le développé-couché, une pour le soulevé de terre, une pour le squat. Cela en devient ridicule, nous préférons un tableau passe-partout qui ne sera qu'une étape transitoire dans la recherche de la répétition maximale réelle.

Prédiction de la RM1		Comparaison de 3 intensités		
Auteurs	Formules	3 RM	10 RM	20 RM
Adams (1998) (1)	w / (1 – (0.02 x R))	94 %	80 %	60 %
Berger (1961) (6)	$w / (1.0261e^{-0.0262 \times r})$	95 %	79 %	61 %
Brown (1992) (12)	(R x 0.0328 + 0.9849) x w	92 %	76 %	61 %
Brzycki (1993) (13)	w / (1.0278 – 0.0278 x r)	94 %	75 %	47 %
Epley (1995) (18)	(0.033 x R x w) + w	91%	75 %	60 %
Kemmler et al (2006) (52)	$W \times (0.988 - (0.0000584 \times R^3 + 0.00190 \times R^2 + 0.0104 \times R))$	96 %	75 %	41 %
Lander (1985) (57)	w / (1.013 – (0.0267123 X R))	91 %	78 %	65 %
Lombardi (1989) (60)	$R^{0,1} \times W$	93 %	79 %	74 %
Mayhew (1985) (69)	$w / (0.522 + (0.419 \times e^{-0.055 \times R})$	88 %	76 %	66 %
O'Connor (1989) (78)	w x (1 + (0.025 x R)) ou 0.025 (W X R) + W	93 %	80 %	67 %
Prévost (2013)	Cf. tableau page 322	89 %	76 %	63 %
Wathen (1994) (100)	$w / (0.488 + 0.538e^{-0.075 \times R})$	92 %	74 %	61 %
Welday (1988) (102)	(R x 0.0333) x W + W	90 %	67 %	33 %
W = Poids utilisé durant la répétition à l'échec R = répétions effectuées				

Tableau 5 : Différentes formules pour estimer le maximum possible en fonction de la charge et du nombre de répétitions effectuées.

Solution proposée (Tableau 8 page 322) :
Évaluer la force maximale Méthode avec RM ≥ 4 et ≤ 20

Il est possible d'extrapoler par le calcul à partir d'une formule avec répétitions supérieures à 10 (maxi 20) grâce à la formule proposée par Pascal PRÉVOST combinant plusieurs travaux scientifiques et présentant les avantages suivants :

- Elle prend en compte l'existence d'une relation curvilinéaire entre répétition et charge entre 1-RM et 25-RM avec une rapide diminution de la charge entre 1-RM et 3-RM (66, 95 ; figure 8).
- Elle est valable chez les hommes et les femmes, les jeunes et les athlètes seniors (52, 66).
- Elle rend possible l'utilisation d'un nombre de répétitions supérieur ou égal à 10 pour les personnes moins bien conditionnées physiquement.
- Elle utilise une charge relative au 1-RM et non relative au poids de corps, car cette seconde approche est moins précise (68).
- Elle reste valable après un programme d'entraînement. Même si la force augmente en valeur absolue, la relation entre répétition et charge exprimée en pourcentage de 1RM reste inchangée (11, 44, 46, 67).
- Elle permet de s'abstraire de la relation %1RM – répétition qui n'est pas valide. En effet, il a été démontré qu'il n'est pas possible de prédire le 1RM à partir du nombre de répétitions exécuté pour un pourcentage de 1RM donné (11, 43, 44, 67).
  En d'autres termes, les athlètes peuvent faire plus de répétitions pour un %1-RM donné après un entraînement, mais la relation exprimée en charge vs. rép ne change pas. Par ailleurs, cela reste vrai quel que soit le niveau de pratique, pour les hommes et pour les femmes (65, 67).

**1 RM = [charge / (0,522 + (0,419 x EXP (-0,055 x répétition)))
+ (0,033 x rép x charge) + charge] / 2**

où charge = charge soulevée en kilos, répétition = nombre de répétitions exécutées à l'échec, EXP = exponentiel. La forme proposée ici est directement utilisable dans un tableur.

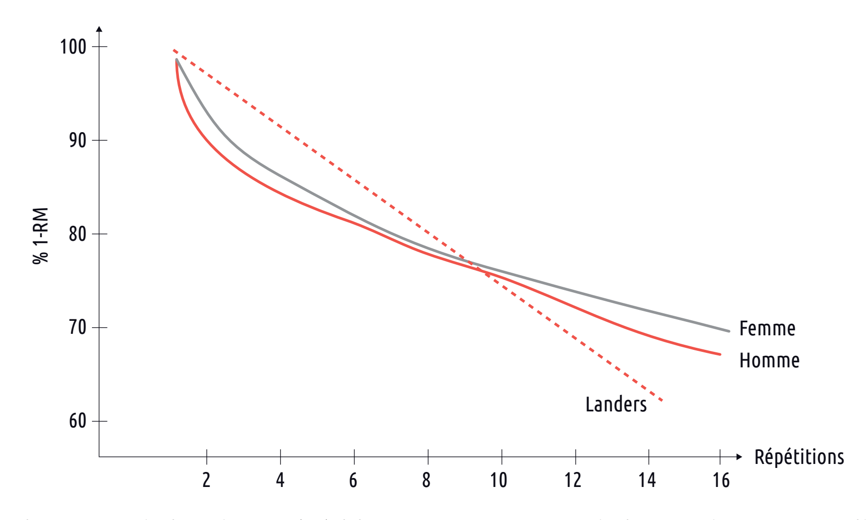


Figure 8 : Relation charge-répétition. Notez que cette relation est de nature curvilinéaire et non linéaire comme beaucoup de livres ou d'articles le laissent à penser. Il en est de même pour la FCmax par rapport à l'âge. Nous avons utilisé la représentation en pourcentage de 1RM pour comparer les deux approches, mais cette expression en % n'est pas valide dans l'absolu sur le terrain car l'entraînement peut augmenter le nombre de répétitions exécuté pour un %1-RM donné (d'après 57, 65, 67).

Les régimes de fonctionnement (contraction) du muscle comme logique pour l'entraînement

Les méthodes de musculation sont parfois liées aux différents régimes de contraction du muscle (Figure 9). Tenez-vous debout, bras le long du corps avec une boule de pétanque dans la main droite. Vous fléchissez le coude, votre biceps (entre autres) se contracte, ses insertions se rapprochent, vous êtes en "concentrique". Votre boule de pétanque est en haut de l'épaule, vous redescendez doucement la boule, votre biceps est contracté mais il relâche sa tension afin de laisser la boule descendre et il freine cette descente, vous êtes en "excentrique", les insertions du muscle s'éloignent. Durant la descente, à mi-chemin, vous stoppez et restez immobile. Vous ne pourriez pas rester des heures comme ceci car le muscle fatiguerait, il travaille toujours mais pour vous maintenir en statique, c'est

de l'isométrie. Maintenant, tout en restant figé, je vous demande uniquement, par le mouvement de l'avant-bras et les degrés de liberté que vous offre le coude, de lancer le plus loin la boule de pétanque ? Qu'allez-vous faire ? Vous allez partir de l'épaule avec la boule, descendre le plus vite possible et repartir vers le haut en lâchant cette dernière. Tout ceci le plus vite possible. Vous allez intuitivement rechercher la plus grande tension dans votre muscle pour libérer son potentiel explosif. Vous venez de faire de la pliométrie.

Nous pouvons exploiter les régimes de contraction que le muscle offre pour accentuer des méthodes de musculation. Certains sont à dominante concentrique, d'autres isométrique... Les avantages et inconvénients sont décris ci-après.

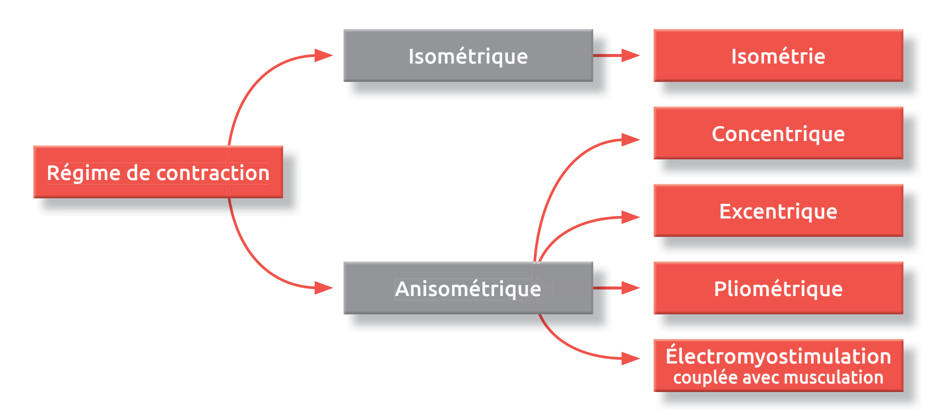


Figure 9 : Les régimes de contractions musculaires

Le régime concentrique (méthode "positive")

La musculation classique est essentiellement basée sur ce principe, le concentrique pur (avec machine ou aide extérieur). Il n'est presque pas traumatisant pour le muscle et évite en grande partie les courbatures. Hormis pour le cyclisme, il est rarement le mode principal de contraction.

Parfois, l'empirisme nous amène à penser de manière erronée que le concentrique est l'élément moteur du mouvement : l'exemple du départ en starting-blocks laisse à penser que tous les extenseurs du membre inférieur fonctionnent en concentrique. Or, vu la configuration des starting-blocks (17), le talon est laissé sans appui au moment de la poussée, imposant ainsi une contraction excentrique préalable.

Il sollicite peu les structures passives du muscle, ce qui est utile lorsque les structures musculaires ou tendineuses sont encore fragiles. Il semble sécuritaire et nous aurions envie intuitivement de l'utiliser principalement en musculation, comme le rappelle Jacques Duchâteau (17) :

Un programme de musculation doit être spécifique en fonction du régime de contraction, chaque régime de contraction possède ses caractéristiques. La plupart des sports utilisent les mouvements balistiques ou pliométriques. Il est bon de comprendre pourquoi l'on préférera un régime de contraction à un autre. L'utilisation de l'isométrie ou de l'excentrique permettra d'augmenter la raideur musculo-tendineuse (le muscle est moins compliant), permettant de mieux transmettre les tensions musculaires plus rapidement, favorisant l'augmentation de la vitesse de mouvement.

L'inconvénient principal est donc lié à son utilisation exclusive. En effet, peu de muscles, peu d'activités utilisent uniquement ce mode de contraction. L'entraînement dans ce mode exclusif de contraction ne permettra pas de préparer le sportif aux différents efforts.

Synthèse du mode concentrique

Avantages

- Il favorise la compliance du muscle (à utiliser si nécessaire).
- Il agit sur les facteurs nerveux en sollicitant, pour une tension donnée, un grand nombre d'unités motrices, il se révèle efficace à l'échauffement.

- Il a peu d'action sur les structures passives du muscle et n'entraîne presque pas de courbatures.

Inconvénients

- Grand consommateur d'énergie métabolique comparé aux autres modes contractiles.
- Grand consommateur d'énergie nerveuse : innervation motrice (50).
- Efficace pour l'hypertrophie (peut également être considéré comme un avantage en fonction de l'objectif).
- Il n'est pas le régime de contraction principal des activités physiques et sportives.

Le régime excentrique (méthode "négative")

Dans le freinage d'un sprint, plus le temps pour amortir la course est long, moins le geste est efficace. L'énergie est dissipée sous forme de chaleur alors que l'objectif est de restituer rapidement cette énergie.

L'image de ce régime de contraction est parfois diabolisée par de mauvaises expériences. En effet, il arrive que l'utilisation en musculation soit effectuée avec des niveaux d'intensités très élevées dus à de mauvaises interprétations de la littérature sur muscle isolé. Nous avons pu lire qu'il était possible de développer 140 % de la force maximale concentrique. Nous déconseillons formellement de telles charges, 110 % est un niveau maximal conseillé pour le pratiquant très expérimenté. Il a été démontré également qu'il n'était pas conseillé d'utiliser le régime excentrique suite à une série d'entraînement intense (2).

Au-delà de la mauvaise image de ce régime, il est bon de se rappeler que dans la marche, par exemple, les activités musculaires sont essentiellement excentriques ou basées sur le cycle étirement/raccourcissement, ce qui est à l'origine de son fonctionnement économique. La descente d'escaliers est essentiellement réalisée par un contrôle excentrique de la chaîne d'extension des membres inférieurs. Les activités excentriques

interviennent de façon importante dans la stabilité des articulations et elles sont très présentes au cours de la journée.

Principaux effets sur l'ultrastructure

Composante élastique série

Pour la partie active de la CES, le travail excentrique diminue la compliance du système contractile. Dans sa partie passive, il augmente la raideur du système tendineux par augmentation de la densité du collagène. Plus le tendon est raide, plus vite il transmet les forces (le tissus conjonctif s'adapte au travail de musculation). Attention : un tissu peut être à la fois raide et extensible ! (Cf. chapitre "Souplesse").

Stries Z

Le travail excentrique entraîne un certain nombre de courbatures qui sont essentiellement dues à des microlésions (DOMS, Delayed onset muscle soreness), voire des nécroses des stries Z, et notamment dans les fibres IIx qui possèdent des stries Z plus minces. Ce phénomène permet de posséder un muscle plus "fort" lors des prochaines utilisations.

Adaptations neuromotrices

Pour un sujet confronté à un travail excentrique intense, on observe une facilitation de l'inhibition réciproque ainsi qu'une levée d'inhibition du réflexe myotatique inverse (10), mais également une régulation myotatique accrue (85).

Synthèse du mode excentrique

Avantages

- Il permet dans certains cas un recrutement préférentiel des fibres de type IIx.
- Il accroît la raideur active musculaire, permettant ainsi une plus grande efficacité du cycle "étirement-raccourcissement" et de la force explosive réactive.
- Il prédispose la réponse concentrique par facilitation de la boucle myotatique.

- Il permet de générer des tensions de 30 à 50 % supérieures à la force maximale volontaire isométrique (pour la pratique musculation, nous resterons à 10 % de plus maximum).
- Il diminue le temps de couplage excentrique-concentrique d'un geste pliométrique.
- Il améliore la force concentrique après restructuration des stries Z et augmente la densité du collagène tendineux.
- Il est un peu moins consommateur d'énergie métabolique que le concentrique (un tiers de l'énergie dépensée lors du concentrique).
- Il optimise la sollicitation nerveuse grâce à l'utilisation d'une seule et unique stratégie de recrutement.
- Il a peu d'effet sur le volume musculaire (chez l'homme).

Inconvénients

- Courbatures musculaires intenses, les vitesses de récupération et de surcompensation sont plus ou moins longues selon les tensions créées et les niveaux d'entraînement (6 à 12 semaines).
- Risque de lésions musculaires ou tendineuses en cas d'entraînement mal adapté.

Isométrie (méthode "statique")

Même dans l'utilisation de l'isométrie, nous pouvons visualiser deux manières de faire. Lors d'une phase de descente en flexion de jambes avec arrêt, nous pourrions parler d'isométrie à sollicitation excentrique ainsi que l'inverse où nous parlerions d'isométrie à sollicitation concentrique.

Isométrie à sollicitation "excentrique"

Il s'agit de maintenir une position dans la phase excentrique d'un mouvement. Nous pourrions envisager de voir ce genre de situation en aval d'un futur travail excentrique.
Les tensions actives et passives sont sollicitées, nous pouvons considérer cet exercice comme un étirement myotendineux.

Isométrie à sollicitation "concentrique"

Il s'agit de maintenir une position en dessous de l'angle optimal dans la phase concentrique d'un mouvement. Le sarcomère tend à se raccourcir et est moins sollicité dans ses structures passives dans un premier temps ; cet exercice peut être considéré comme un étirement tendineux. Il a l'avantage d'être réalisé en toute sécurité puisqu'il s'agit de "forcer" dans une production de force accessible. Même pour de l'isométrie avec production de force maximale (pousser une charge fixe), le mouvement peut être arrêté à tout moment.

Synthèse du mode isométrique

Avantages

- Les exercices isométriques sont faciles à mettre en place.
- L'augmentation de la force se fait principalement dans la position angulaire travaillée ; cela peut être intéressant pour travailler un angle faible ou au contraire l'angle dans lequel le sportif a besoin de force (94).
- Il augmente la raideur musculaire, ce qui est utile dans les sports explosifs.
- Il développe une force supérieure (10 %) à la force maximale concentrique.
- Il permet un recrutement massif d'UM dont le tremblement observé du muscle serait le signe.
- Il permet de recruter les fibres rapides par un travail de pré-fatigue.

Inconvénients

- Il ne peut être utilisé seul pour des raisons de spécificité de force (17, 63).
- Il n'augmente la force que dans la longueur musculaire travaillée (comme nous l'avons indiqué, c'est aussi un avantage).
- Il est défavorable aux coordinations intermusculaires.
- Par ses contractions constantes, il n'est pas favorable à l'angiogénèse.
- Il est peu favorable au travail explosif, sauf dans les méthodes comme le stato-dynamique.
- Courbatures importantes mais inférieures à l'excentrique.

Pliométrie (méthode "ressort")

La pliométrie ou cycle étirement-raccourcissement "stretch-shortening cycle" est le régime de contraction qui utilise à la fois l'excentrique, l'isométrique et le concentrique. Pour effectuer un saut en hauteur le plus haut sur place, spontanément, nous allons tous effectuer une phase excentrique rapide afin de provoquer un allongement qui aura pour effet de laisser plus de temps à la force de s'exprimer. De plus, cette phase rapide va exercer un réflexe dit myotatique qui, allié à la remontée concentrique, permettra au muscle de produire plus de force.
C'est le régime utilisé dans la plupart de nos activités quotidiennes et sportives.

Sans préparation initiale (travail de musculation lourd et travail des placements corporels) au travail pliométrique intense, il est possible d'obtenir des blessures ralentissant la progression du sportif. Nous éviterons son utilisation exclusive ainsi que des intensités trop élevées.

Synthèse du mode pliométrique

Avantages

- Il développe une force supérieure à la force maximale volontaire.
- Il diminue le temps de couplage excentrique-concentrique.
- Il augmente la raideur active et diminue la compliance.
- Il améliore les coordinations intermusculaires.
- Il facilite la synchronisation de l'activité musculaire et l'activité myotatique par réduction des inhibitions.
- Il correspond aux gestuelles de la quasi-totalité des APS.
- Il n'a pas d'effet sur le volume musculaire.

Inconvénients

- Demande un travail initial de préparation musculaire pour le travail pliométrique intense
- Nécessite de bons placements.

Le déséquilibre musculaire (entre les membres gauche et droit)

L'évaluation de l'homogénéité de la force bilatérale des membres supérieurs et inférieurs est à la mode depuis quelques années.

Au-delà de la mode, nous ne savons pas encore très bien si le déséquilibre de force est néfaste à la performance mais nous pensons qu'avec un déséquilibre supérieur à 20 %, la probabilité de déséquilibrer l'individu jusqu'à la blessure est trop importante.

Testez votre déséquilibre avec une des propositions suivantes.

Tableau 6

Formules pour connaître le déséquilibre bilatérale de force	
[1 - (membre le plus faible / membre le plus fort)] x 100	[(membre fort – membre faible) / membre fort] x 100
Vous obtenez au leg-extension : Cuisse gauche : 55 kg Cuisse droite : 67 kg [1 - (membre le plus faible / membre le plus fort)] x 100 [1 - (55 / 67)] x 100 17,9 % d'écart entre les 2 cuisses.	Vous obtenez au leg-extension : Cuisse gauche : 55 kg Cuisse droite : 67 kg [(membre fort – membre faible) / membre fort] x 100 [(67 – 55)/67] x 100 17,9 % d'écart entre les 2 cuisses.
Choisissez celle que vous préférez, celle de droite semble plus facile à mémoriser et à taper sur la calculatrice.	

Par la suite, modifiez votre entraînement en effectuant de la musculation unilatérale :

- Des squats Heidein (squat une jambe) à la place du squat.
- Du développé haltère un bras...
- Et surtout, si ce déséquilibre est consécutif à un problème de posture, nous conseillons de consulter un posturologue et/ou ostéopathe. Bascule des épaules, bascule du bassin, rotation des épaules ou du bassin, blessures répétées du même côté. Tous ces signes devraient vous amener à consulter. La musculation ne peut pas tout faire.

À savoir : 84 % des droitiers ont l'épaule gauche plus haute ; pour le CIES (collège international d'étude de la statique), le déficit neuromusculaire et microcirculatoire dans le membre supérieur de l'épaule la plus basse permet d'expliquer une grande partie des tendinites.

Déficit bilatéral

Autre particularité, en partant du même exemple (leg-extension) (47) :
- Cuisse gauche : 55 kg
- Cuisse droite : 67 kg

Vous devriez soulever avec les 2 membres :
- 55 + 67 = 122 kg théoriquement

La réalité est que l'on soulève souvent moins. Dans notre exemple, nous soulevons 115 kg.

Pour définir ce que les scientifiques appellent le "déficit bilatéral", il faut appliquer la formule suivante (53) :
- [(somme des membres en bilatéral)/(somme des membres en unilatéral) x 100]-100
- DI = [(115)/(55+67) x 100]-100
- DI = -5,74 %

Ce chiffre n'est pas si mal, nous devrions être proches de zéro. Lorsque le résultat est négatif, on parle de **déficit bilatéral**, lorsqu'il est positif, on parle de **facilitation bilatérale**.

Si vous diminuez ce chiffre durant votre entraînement, vous exprimez davantage votre force grâce à une meilleure perception sans doute de la position spécifique que vous utilisez. Même si, pour l'instant, les études manquent de recul pour en déduire plus d'applications pratiques, nous en gardons toujours le même principe. Vos méthodes de travail doivent être le plus proches possible de votre discipline, l'angle au squat, le régime de contraction... Le système nerveux reste l'acteur dominant de la performance, ne l'éloignez pas de ce qu'il sait faire.

Quelques méthodes de développement de la force

Il existe un nombre infini de possibilités de pratiquer le développement de la force. Nous vous proposons les plus connues et en rapport avec une dominante de l'utilisation d'un régime de contraction.

Tableau 7

<table>
<tr><th>Régime de contraction</th><th>Méthodes</th><th>Répétitions, séries, temps de récupération</th><th>Récupération</th></tr>
<tr><td colspan="4">RM = répétition maximale, le % est un repère pour trouver la charge, mais s'il est noté dans le tableau 6 RM, alors vous devez faire 6 répétitions seules, la septième est impossible.
Il faut toujours avoir un partenaire d'entraînement pour pratiquer au bord de l'échec musculaire.
Si il est écrit 6 r, alors nous parlons de 6 répétitions sans échec musculaire (exemple : 6 r à 50 % de la RM).
Les % de la RM sont en fonction du tableau de Prévost (voir fin de chapitre).
Le nombre de séries est par défaut de 3, nous vous laissons le choix de ce nombre.</td></tr>
<tr><td>Concentrique</td><td>Méthode volontaire</td><td>6 r (60 %) x 3 séries
Récupération de 3 min</td><td>Très rapide</td></tr>
<tr><td colspan="4">Cette méthode doit se faire au mieux avec partenaires ou sur machine guidée.
La phase excentrique doit être la plus amoindrie possible.
L'absence de tension excentrique limite les courbatures et inhibe une aide du tissu conjonctif pour la remontée de la charge. Cela oblige le système nerveux à travailler davantage.
Ce travail est équivalent à un travail à 80 % de la RM.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Méthodes proposées par Zatsiorsky</td><td>Efforts répétés</td><td>6 RM (83 %) x 3 séries
Récupération de 3 min</td><td>Moyenne</td></tr>
<tr><td>Efforts maximaux</td><td>3RM (89 %) x 3 séries
Récupération de 3 min</td><td>Moyenne</td></tr>
<tr><td>Efforts dynamiques</td><td>6 r (50 %) x 3 séries
Récupération de 3 min</td><td>Moyenne</td></tr>
<tr><td colspan="4">Bien que la perception de cette méthode soit très facile, ne cherchez pas à faire plus de répétitions, n'allez pas jusqu'à 15 répétitions, la qualité prime.
En revanche, bien rechercher la vitesse maximale, surtout sur la phase concentrique.</td></tr>
<tr><td></td><td>Bulgare classique</td><td>[3 r (85 %) + 6 r (50 %)] x 3 séries
Récupération de 3 min</td><td>Moyenne</td></tr>
<tr><td colspan="4">Le Bulgare ou contraste de charge demande d'enchaîner les 2 formes de travail sans temps de repos, juste le temps de décharger, ne vous pressez pas, vous avez le temps, vous ne perdez pas en qualité.</td></tr>
</table>

	Bulgare intense	[3 RM (89%) + 6 r (50 %)] x 3 séries Récupération de 3 min	Longue
Isométrique	Stato-dynamique 1 temps	6 r (70 %) x 3 séries Récupération de 3 min	Très rapide
Travail équivalent au travail des charges lourdes par son intensité, mais sa charge moyenne permet une bonne récupération. Descendez en amplitude, amorcez la phase concentrique puis marquez un temps d'arrêt de 3 secondes avant de reprendre la phase concentrique le plus vite possible.			
	Isométrie totale	20 s en flexion à 70 % x 3 séries Récupération de 3 min	Longue
Tenir 20 secondes en statique, nous vous conseillons de faire 6 sauts (membres inférieurs) après la pause de la barre ou 6 mouvements dynamiques.			
	Stato-dynamique 2 temps	6 r (60 %) x 3 séries Récupération de 3 min	Longue
Même chose que le stato 1 temps mais avec 2 temps d'arrêt.			
	Isométrie maximale	3 RM (170 %) de 4 s x 3 séries Récupération de 3 min	Très longue
Un bon travail isométrique consiste à pousser sur une barre déjà positionnée dans un angle souhaité (descendre la barre au squat, se mettre sur une barre guidée pour le développé couché). Vous devez pousser le plus fort possible, la barre extrêmement chargée ne doit pas bouger, cela serait dangereux. Aussi, nous conseillons 170 % de votre maxi, vous êtes persuadé de ne pas déplacer la charge. Assurez-vous d'être certain de votre RM. 4 secondes de poussée, 4 secondes de relâchement puis refaites l'opération encore 2 fois. Travail difficile, à ne pas faire chez le débutant.			
Excentrique	Bulgare excentrique	4 RM (105 %) x 1 série	Très longue
Obligatoirement, vous devez être assisté pour faire ce travail ou n'utiliser qu'un membre en phase excentrique et les deux membres en phase concentrique (exemple de la presse). L'excentrique consiste à mettre au-dessus de son maximum, ne cherchez pas à mettre trop lourd, nous savons que cela ne sert pas a améliorer la performance. 105 % est largement suffisant et limite les risques. Descendre assez rapidement, se faire aider d'une ou deux personnes pour la remontée. Travail pour personne confirmée.			
Pliométrie	Pliométrie moyenne	8 r (50 %) x 3 séries Récupération de 3 min	Moyenne
Lors de la descente rapide, effectuez 3 ou 4 rebonds rapides en fin d'amplitude et remontez très vite.			
	Pliométrie Bulgare intense	3 r (85 %) + 5 r (50 %) + 5 sauts > 40 cm de haut x 3 séries Récupération de 4 min	Longue
3 répétitions et non 3 RM, enchaînez avec la même méthode que la pliométrie moyenne puis, sans la barre, effectuez 5 sauts par-dessus une mini-haie de 40 cm.			

Tableau 8 : Estimation du 1-RM à partir de la formule de PRÉVOST (2013). Elle est proposée en remplacement de Brzycki (1993) dont les erreurs systématiques augmentent avec le nombre de répétitions (51). Sa forme est directement utilisable dans un tableur.

1 RM = [charge / (0.522 + (0.419 x e ^ (-0.055 rép))) + (0.033 x rép x charge) + charge] / 2														
IRM	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Charges indicatives arrondies au kg supérieur														
300	275	268	261	255	249	243	237	232	227	223	218	214	210	206
297,5	273	266	259	253	247	241	235	230	225	221	216	212	208	204
295	271	264	257	251	245	239	233	228	224	219	215	210	206	203
292,5	268	261	255	248	242	237	232	226	222	217	213	209	205	201
290	266	259	253	246	240	235	230	225	220	215	211	207	203	199
287,5	264	257	250	244	238	233	228	223	218	213	209	205	201	198
285	262	255	248	242	236	231	226	221	216	212	207	203	199	196
282,5	259	252	246	240	234	229	224	219	214	210	206	202	198	194
280	257	250	244	238	232	227	222	217	212	208	204	200	196	192
277,5	255	248	242	236	230	225	220	215	210	206	202	198	194	191
275	252	246	239	234	228	223	218	213	208	204	200	196	192	189
272,5	250	244	237	231	226	221	216	211	207	202	198	194	191	187
270	248	241	235	229	224	219	214	209	205	200	196	193	189	186
267,5	245	239	233	227	222	217	212	207	203	199	195	191	187	184
265	243	237	231	225	220	215	210	205	201	197	193	189	185	182
262,5	241	235	229	223	218	213	208	203	199	195	191	187	184	180
260	239	232	226	221	216	211	206	201	197	193	189	185	182	179
257,5	236	230	224	219	213	209	204	199	195	191	187	184	180	177
255	234	228	222	217	211	206	202	197	193	189	185	182	178	175
252,5	232	226	220	214	209	204	200	195	191	187	184	180	177	174
250	229	223	218	212	207	202	198	194	189	186	182	178	175	172
247,5	227	221	216	210	205	200	196	192	188	184	180	177	173	170
245	225	219	213	208	203	198	194	190	186	182	178	175	171	168
242,5	223	217	211	206	201	196	192	188	184	180	176	173	170	167
240	220	214	209	204	199	194	190	186	182	178	175	171	168	165
237,5	218	212	207	202	197	192	188	184	180	176	173	169	166	163

235	216	210	205	200	195	190	186	182	178	174	171	168	164	162
232,5	213	208	202	197	193	188	184	180	176	173	169	166	163	160
230	211	206	200	195	191	186	182	178	174	171	167	164	161	158
227,5	209	203	198	193	189	184	180	176	172	169	165	162	159	156
225	206	201	196	191	187	182	178	174	171	167	164	161	157	155
222,5	204	199	194	189	184	180	176	172	169	165	162	159	156	153
220	202	197	192	187	182	178	174	170	167	163	160	157	154	151
217,5	200	194	189	185	180	176	172	168	165	161	158	155	152	149
215	197	192	187	183	178	174	170	166	163	160	156	153	150	148
212,5	195	190	185	180	176	172	168	165	161	158	155	152	149	146
210	193	188	183	178	174	170	166	163	159	156	153	150	147	144
207,5	190	185	181	176	172	168	164	161	157	154	151	148	145	143
205	188	183	179	174	170	166	162	159	155	152	149	146	143	141
202,5	186	181	176	172	168	164	160	157	153	150	147	144	142	139
200	184	179	174	170	166	162	158	155	152	148	145	143	140	137
197,5	181	176	172	168	164	160	156	153	150	147	144	141	138	136
195	179	174	170	166	162	158	154	151	148	145	142	139	136	134
192,5	177	172	168	163	160	156	152	149	146	143	140	137	135	132
190	174	170	165	161	158	154	150	147	144	141	138	136	133	131
187,5	172	168	163	159	155	152	148	145	142	139	136	134	131	129
185	170	165	161	157	153	150	146	143	140	137	135	132	129	127
182,5	167	163	159	155	151	148	144	141	138	135	133	130	128	125
180	165	161	157	153	149	146	142	139	136	134	131	128	126	124
177,5	163	159	155	151	147	144	140	137	135	132	129	127	124	122
175	161	156	152	149	145	142	139	135	133	130	127	125	122	120
172,5	158	154	150	147	143	140	137	134	131	128	125	123	121	119
170	156	152	148	144	141	138	135	132	129	126	124	121	119	117
167,5	154	150	146	142	139	136	133	130	127	124	122	119	117	115
165	151	147	144	140	137	134	131	128	125	122	120	118	115	113
162,5	149	145	142	138	135	132	129	126	123	121	118	116	114	112
160	147	143	139	136	133	130	127	124	121	119	116	114	112	110
157,5	145	141	137	134	131	128	125	122	119	117	115	112	110	108

155	142	139	135	132	128	126	123	120	117	115	113	111	108	107
152,5	140	136	133	130	126	123	121	118	116	113	111	109	107	105
150	138	134	131	127	124	121	119	116	114	111	109	107	105	103
147,5	135	132	128	125	122	119	117	114	112	109	107	105	103	101
145	133	130	126	123	120	117	115	112	110	108	105	103	101	100
142,5	131	127	124	121	118	115	113	110	108	106	104	102	100	98
140	128	125	122	119	116	113	111	108	106	104	102	100	98	96
137,5	126	123	120	117	114	111	109	106	104	102	100	98	96	94
135	124	121	118	115	112	109	107	105	102	100	98	96	94	93
132,5	122	118	115	113	110	107	105	103	100	98	96	95	93	91
130	119	116	113	110	108	105	103	101	99	96	95	93	91	89
127,5	117	114	111	108	106	103	101	99	97	95	93	91	89	88
125	115	112	109	106	104	101	99	97	95	93	91	89	87	86
122,5	112	109	107	104	102	99	97	95	93	91	89	87	86	84
120	110	107	104	102	99	97	95	93	91	89	87	86	84	82
117,5	108	105	102	100	97	95	93	91	89	87	85	84	82	81
115	106	103	100	98	95	93	91	89	87	85	84	82	80	79
112,5	103	101	98	96	93	91	89	87	85	84	82	80	79	77
110	101	98	96	93	91	89	87	85	83	82	80	78	77	76
107,5	99	96	94	91	89	87	85	83	81	80	78	77	75	74
105	96	94	91	89	87	85	83	81	80	78	76	75	73	72
102,5	94	92	89	87	85	83	81	79	78	76	75	73	72	70
100	92	89	87	85	83	81	79	77	76	74	73	71	70	69
97,5	89	87	85	83	81	79	77	75	74	72	71	70	68	67
95	87	85	83	81	79	77	75	74	72	71	69	68	66	65
92,5	85	83	81	79	77	75	73	72	70	69	67	66	65	64
90	83	80	78	76	75	73	71	70	68	67	65	64	63	62
87,5	80	78	76	74	73	71	69	68	66	65	64	62	61	60
85	78	76	74	72	70	69	67	66	64	63	62	61	59	58
82,5	76	74	72	70	68	67	65	64	63	61	60	59	58	57
80	73	71	70	68	66	65	63	62	61	59	58	57	56	55
77,5	71	69	67	66	64	63	61	60	59	58	56	55	54	53

75	69	67	65	64	62	61	59	58	57	56	55	54	52	52
72,5	67	65	63	62	60	59	57	56	55	54	53	52	51	50
70	64	63	61	59	58	57	55	54	53	52	51	50	49	48
67,5	62	60	59	57	56	55	53	52	51	50	49	48	47	46
65	60	58	57	55	54	53	51	50	49	48	47	46	45	45
62,5	57	56	54	53	52	51	49	48	47	46	45	45	44	43
60	55	54	52	51	50	49	47	46	45	45	44	43	42	41
57,5	53	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	40
55	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	38
52,5	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	37	36
50	46	45	44	42	41	40	40	39	38	37	36	36	35	34
47,5	44	42	41	40	39	38	38	37	36	35	35	34	33	33
45	41	40	39	38	37	36	36	35	34	33	33	32	31	31
42,5	39	38	37	36	35	34	34	33	32	32	31	30	30	29
40	37	36	35	34	33	32	32	31	30	30	29	29	28	27
37,5	34	34	33	32	31	30	30	29	28	28	27	27	26	26
35	32	31	30	30	29	28	28	27	27	26	25	25	24	24
32,5	30	29	28	28	27	26	26	25	25	24	24	23	23	22
30	28	27	26	25	25	24	24	23	23	22	22	21	21	21

Pour conclure, citons quelques études qui dérangent quelque peu les pratiques de terrain. Si l'on demande à des hommes sportifs non entraînés expérimentés de faire des séries à l'épuisement, l'activation neuromusculaire est similaire quelle que soit la charge utilisée pour des répétitions MAXIMALES allant de 5 à 20. Cela signifie d'un point de vue pratique que la force maximale pourrait être travaillée avec des charges très diverses et non pas seulement proches du maximal comme cela est souvent avancé. La condition est que la série se termine à l'échec pour que les sollicitations neurales soient proches du maximum (95 % des unités motrices sont alors recrutées). Les travaux de Hennman et coll. (1962, 1965) démontraient déjà cela !

Bibliographie

• 1 • Adams GM. Exercise Physiology Laboratory Manual. Boston: McGraw-Hill, 1998.

• 2 • Amiridis IG, Cometti G, Morlon B, and Van Hoecke J. Concentric and/or eccentric training-induced alterations in shoulder flexor and extensor strength. J Orthop Sports Phys Ther 25: 26-33, 1997.

• 3 • Behm DG, Faigenbaum AD, Falk B, and Klentrou P. Canadian Society for Exercise Physiology position paper: resistance training in children and adolescents. Appl Physiol Nutr Metab 33: 547-561, 2008.

• 4 • Behringer M, Vom Heede A, Yue Z, and Mester J. Effects of resistance training in children and adolescents: a meta-analysis. Pediatrics 126: e1199-1210, 2010.

• 5 • Benson AC, Torode ME, and Fiatarone Singh MA. A rationale and method for high-intensity progressive resistance training with children and adolescents. Contemporary clinical trials 28: 442-450, 2007.

• 6 • Berger RA. Determination of resistance load for 1-RM and 10-RM. Journal of the Association for Physical and Mental Rehabilitation 51: 100-110, 1961.

• 7 • Blimkie CJ. Resistance training during pre- and early puberty: efficacy, trainability, mechanisms, and persistence. Canadian journal of sport sciences = Journal canadien des sciences du sport 17: 264-279, 1992.

• 8 • Blimkie CJ, Sale DG, and Bar-Or O. Voluntary strength, evoked twitch contractile properties and motor unit activation of knee extensors in obese and non-obese adolescent males. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 61: 313-318, 1990.

• 9 • Blimkie CJR. Resistance Training During Preadolescence: Issues and Controversies. Sports Medicine 15: 389-407, 1993.

• 10 • Bosco C. Cycle étirement-raccourcissement du muscle squelettique et considérations physiologiques sur la force explosive chez l'homme. INSEP, 1985, p 26.

• 11 • Brechue WF and Mayhew JL. Lower-Body Work Capacity and One-Repetition Maximum Squat Prediction in College Football Players. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 364-372 310.1519/JSC.1510b1013e318225eee318223, 2012.

• 12 • Brown HL. Lifetime fitness. Scottsdale, AZ: Gorsceach Scarisbrick, 1992.

• 13 • Brzycki MA. Strength testing: predicting a one-rep max from repetitions to fatigue. Journal Health, Physical Education, Recreation and Dance 64: 88-90, 1993.

• 14 • Burt LA, Greene DA, Ducher G, and Naughton GA. Skeletal adaptations associated with pre-pubertal gymnastics participation as determined by DXA and pQCT: A systematic review and meta-analysis. J Sci Med Sport, 2012.

• 15 • Dahab KS and McCambridge TM. Strength training in children and adolescents: raising the bar for young athletes? Sports health 1: 223-226, 2009.

• 16 • Diallo O, Dore E, Duche P, and Van Praagh E. Effects of plyometric training followed by a reduced training programme on physical performance in prepubescent soccer players. J Sports Med Phys Fitness 41: 342-348, 2001.

• 17 • Duchateau J. La spécificité du renforcement musculaire, in: Entraînement de la force Spécificité et planification. Paris: Publication INSEP, 1997

• 18 • Epley B. Poundage chart. Lincoln, NE: Boyd Epley Workout, 1985.

• 19 • Faigenbaum AD. Strength training for children and adolescents. Clin Sports Med 19: 593-619, 2000.

• 20 • Faigenbaum AD, Farrell A, Fabiano M, Radler T, Naclerio F, Ratamess NA, Kang J, and Myer GD. Effects of integrative neuromuscular training on fitness performance in children. Pediatr Exerc Sci 23: 573-584, 2011.

• 21 • Faigenbaum AD, Kraemer WJ, Blimkie CJ, Jeffreys I, Micheli LJ, Nitka M, and Rowland TW. Youth resistance training: updated position statement paper from the national strength and conditioning association. J Strength Cond Res 23: S60-79, 2009.

• 22 • Faigenbaum AD, Loud RL, O'Connell J, Glover S, O'Connell J, and Westcott WL. Effects of Different Resistance Training Protocols on Upper-Body Strength and Endurance Development in Children. The Journal of Strength & Conditioning Research 15: 459-465, 2001.

• 23 • Faigenbaum AD and Micheli LJ. Preseason conditioning for the preadolescent athlete. Pediatric annals 29: 156-161, 2000.

• 24 • Faigenbaum AD, Milliken LA, Loud RL, Burak BT, Doherty CL, and Westcott WL. Comparison of 1 and 2 days per week of strength training in children. Res Q Exerc Sport 73: 416-424, 2002.

• 25 • Faigenbaum AD, Milliken LA, and Westcott WL. Maximal Strength Testing in Healthy Children. The Journal of Strength & Conditioning Research 17: 162-166, 2003.

• 26 • Faigenbaum AD and Myer GD. Pediatric resistance training: benefits, concerns, and program design considerations. Curr Sports Med Rep 9: 161-168, 2010.

• 27 • Faigenbaum AD, Ratamess NA, McFarland J, Kaczmarek J, Coraggio MJ, Kang J, and Hoffman JR. Effect of rest interval length on bench press performance in boys, teens, and men. Pediatr Exerc Sci 20: 457-469, 2008.

• 28 • Faigenbaum AD, Westcott2 WL, Micheli LJ, Outerbridge AR, Long CJ, LaRosa-Loud R, and Zaichkowsky LD. The Effects of Strength Training and Detraining on Children. The Journal of Strength & Conditioning Research 10: 109-114, 1996.

• 29 • Faigenbaum AD, Westcott WL, Loud RL, and Long C. The effects of different resistance training protocols on muscular strength and endurance development in children. Pediatrics 104: e5, 1999.

• 30 • Falk B and Tenenbaum G. The effectiveness of resistance training in children. A meta-analysis. Sports Med 22: 176-186, 1996.

• 31 • Granacher U and Gollhofer A. Is There an Association Between Variables of Postural Control and Strength in Adolescents? The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 1718-1725 1710.1519/JSC.1710b1013e3181dbdb1708, 2011.

• 32 • Granacher U and Gollhofer A. Is There an Association Between Variables of Postural Control and Strength in Prepubertal Children? The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 210-216 210.1519/JSC.1510b1013e31821b31827c31830, 2012.

• 33 • Granacher U, Muehlbauer T, Doerflinger B, Strohmeier R, and Gollhofer A. Promoting Strength and Balance in Adolescents During Physical Education: Effects of a Short-Term Resistance Training. The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 940-949 910.1519/JSC.1510b1013e3181c1517bb1511e, 2011.

• 34 • Granacher U, Muehlbauer T, Maestrini L, Zahner L, and Gollhofer A. Can Balance Training Promote Balance and Strength in Prepubertal Children? The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 1759-1766 1710.1519/JSC.1750b1013e3181da7886, 2011.

• 35 • Granacher U, Muehlbauer T, Zahner L, Gollhofer A, and Kressig RW. Comparison of Traditional and Recent Approaches in the Promotion of Balance and Strength in Older Adults. Sports Medicine 41: 377-400 310.2165/11539920-000000000-000000000, 2011.

• 36 • Greene DA and Naughton GA. Adaptive skeletal responses to mechanical loading during adolescence. Sports Med 36: 723-732, 2006.

• 37 • Greene DA, Naughton GA, Briody JN, Kemp A, Woodhead H, and Farpour-Lambert N. Musculoskeletal health in elite male adolescent middle-distance runners. J Sci Med Sport 7: 373-383, 2004.

• 38 • Guy JA and Micheli LJ. Strength Training for Children and Adolescents. Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons 9: 29-36, 2001.

• 39 • Guy JA and Micheli LJ. Strength training for children and adolescents. The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons 9: 29-36, 2001.

• 40 • Halin R, Germain P, Bercier S, Kapitaniak B, and Buttelli O. Neuromuscular response of young boys versus men during sustained maximal contraction. Med Sci Sports Exerc 35: 1042-1048, 2003.

• 41 • Halin R, Germain P, Buttelli O, and Kapitaniak B. Differences in strength and surface electromyogram characteristics between pre-pubertal gymnasts and untrained boys during brief and maintained maximal isometric voluntary contractions. Eur J Appl Physiol 87: 409-415, 2002.

• 42 • Hickson RC, Dvorak BA, Gorostiaga EM, Kurowski TT, and Foster C. Potential for strength and endurance training to amplify endurance performance. J Appl Physiol 65: 2285-2290, 1988.

• 43 • Hoeger WW, Barette SL, Hale DF, and Hopkins DR. Relationship between repetitions and selected percentages of one repetition maximum. J Appl Sport Sci Res 1: 11-13, 1987.

• 44 • Hoeger WW, Hopkins DR, Barette SL, and Hale, D. F. Relationship between repetitions and selected pencentages of one repetition maximum: A comparison between untrained and trained males and females. J Appl Sport Sci Res 4: 47-54, 1990.

• 45 • Hoff J, Gran A, and Helgerud J. Maximal strength training improves aerobic endurance performance. Scand J Med Sci Sports 12: 288-295, 2002.

• 46 • Houston ME, Froese EA, Valeriote SP, Green HJ, and Ranney DA. Muscle performance, morphology and metabolic capacity during strength training and detraining: a one leg model. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 51: 25-35, 1983.

• 47 • Impellizzeri FM, Rampinini E, Maffiuletti N, and Marcora SM. A vertical jump force test for assessing bilateral strength asymmetry in athletes. Med Sci Sports Exerc 39: 2044-2050, 2007.

• 48 • Iuliano-Burns S, Saxon L, Naughton G, Gibbons K, and Bass SL. Regional specificity of exercise and calcium during skeletal growth in girls: a randomized controlled trial. J Bone Miner Res 18: 156-162, 2003.

• 49 • Johnson BA, Salzberg CL, and Stevenson DA. A Systematic Review: Plyometric Training Programs for Young Children. The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 2623-2633 2610.1519/JSC.2620b2013e318204caa318200, 2011.

• 50 • Karpovich P and Sinning W. Physiologie de l'activité musculaire. Paris: Editions Vigot, 1975.

• 51 • Kemmler W, Lauber D, Mayhew J, and Wassermann A. Repetitions to fatigue to predict 1-RM performance - Looking behind the covariates, in: Current Results of Strength Training Research: A Multi-Perspective Approach. J Gießing, M Fröhlich, eds. Gottinggen, germany: Curvilier Verlag, 2007, pp 35-58.

• 52 • Kemmler WK, Lauber D, Wassermann A, and Mayhew JL. Predicting Maximal Strength in Trained Postmenopausal Woman. The Journal of Strength & Conditioning Research 20: 838-842, 2006.

• 53 • Khodiguian N, Cornwell A, Lares E, DiCaprio PA, and Hawkins SA. Expression of the bilateral deficit during reflexively evoked contractions. J Appl Physiol 94: 171-178, 2003.

• 54 • Korff T, Horne SL, Cullen SJ, and Blazevich AJ. Development of lower limb stiffness and its contribution to maximum vertical jumping power during adolescence. J Exp Biol 212: 3737-3742, 2009.

• 55 • Korff T, Hunter EL, and Martin JC. Muscular and non-muscular contributions to maximum power cycling in children and adults: implications for developmental motor control. J Exp Biol 212: 599-603, 2009.

• 56 • Lambertz D, Mora I, Grosset JF, and Perot C. Evaluation of musculotendinous stiffness in prepubertal children and adults, taking into account muscle activity. J Appl Physiol 95: 64-72, 2003.

• 57 • Landers J. Maximum based on reps. National Strength and Conditionning Association Journal 6: 60-61, 1985.

• 58 • Lombard WP. The action of two-joint muscles. American Physical Education Review 8: 141-145, 1903.

• 59 • Lombard WP and Abbott FM. The mechanical effects produced by the contraction of individual muscles of the thigh of the frog. American Journal of Physiology 10: 1-60, 1907.

• 60 • Lombardi VP. Beginning weight training. Dubuque, IA: W.C. Brown, 1989.

• 61 • Malina RM. Weight Training in Youth-Growth, Maturation, and Safety: An Evidence-Based Review. Clinical Journal of Sport Medicine 16: 478-487 410.1097/1001.jsm.0000248843.0000231874.be, 2006.

• 62 • Marina M, Jemni M, Rodriguez FA, and Jimenez A. Plyometric jumping performances of male and female gymnasts from different heights. J Strength Cond Res 26: 1879-1886, 2012.

• 63 • Marini JF, Van Hoecke J, and Mathieu C. Adaptation du muscle à l'entraînement, in: Renforcement musculaire. Paris: INSEP-Publications, 1984, pp 55-78.

• 64 • Markovic G. Does plyometric training improve vertical jump height? A meta-analytical review. Br J Sports Med 41: 349-355; discussion 355, 2007.

• 65 • Mayhew JL, Ball TE, and Arnold MD. Prediction of 1RM bench press from submaximal bench press performance in college males and females. J Appl Sport Sci Res 3, 1989.

• 66 • Mayhew JL, Ball TE, Arnold MD, and Bowen JC. Relative muscular endurance performance as a predictof of bench press strength in college men and women. Journal of Applied Sport Science Research 6: 200-206, 1992.

• 67 • Mayhew JL, Ball TE, and Bowen JC. Prediction of bench press lifting abiility from submaximal repetitions before and after training. Sports Med, Training and Rehab 3: 195-201, 1992.

• 68 • Mayhew JL, Hill SP, Thompson MD, Johnson EC, and Wheeler L. Using absolute and relative muscle endurance to estimate maximal strength in young athletes. Int J Sports Physiol Perform 2: 305-314, 2007.

• 69 • Mayhew JL, Prinster JL, Ware JS, Zimmer DL, Arabas JR, and Bemben MG. Muscular endurance repetitions to predict bench press strength in men of different training levels. J Sports Med Phys Fitness 35: 108-113, 1995.

• 70 • McCambridge TM and Stricker PR. Strength training by children and adolescents. Pediatrics 121: 835-840, 2008.

• 71 • McKay D and Henschke N. Plyometric training programmes improve motor performance in prepubertal children. Br J Sports Med 46: 727-728, 2012.

• 72 • McKay H, Tsang G, Heinonen A, MacKelvie K, Sanderson D, and Khan KM. Ground reaction forces associated with an effective elementary school based jumping intervention. Br J Sports Med 39: 10-14, 2005.

• 73 • Michailidis Y, Fatouros IG, Primpa E, Michailidis C, Avloniti A, Chatzinikolaou A, Barbero-Alvarez JC, Tsoukas D, Douroudos, II, Draganidis D, Leontsini D, Margonis K, Berberidou F, and Kambas A. Plyometrics' trainability in preadolescent soccer athletes. J Strength Cond Res 27: 38-49, 2013.

• 74 • Michaleff ZA and Kamper SJ. Effects of resistance training in children and adolescents: a meta-analysis. Br J Sports Med 45: 755, 2011.

• 75 • Micheli LJ and Fehlandt AF, Jr. Overuse injuries to tendons and apophyses in children and adolescents. Clin Sports Med 11: 713-726, 1992.

• 76 • Micheli LJ and Ireland ML. Prevention and management of calcaneal apophysitis in children: an overuse syndrome. Journal of pediatric orthopedics 7: 34-38, 1987.

• 77 • Myer GD, Faigenbaum AD, Ford KR, Best TM, Bergeron MF, and Hewett TE. When to initiate integrative neuromuscular training to reduce sports-related injuries and enhance health in youth? Current sports medicine reports 10: 155-166, 2011.

• 78 • O'Connor B, Simmons J, and O'Shea P. Weight Training Today. St-Paul, MN: West Publishing, 1989.

• 79 • Osteras H, Helgerud J, and Hoff J. Maximal strength-training effects on force-velocity and force-power relationships explain increases in aerobic performance in humans. Eur J Appl Physiol 88: 255-263, 2002.

• 80 • Outerbridge AR and Micheli LJ. Overuse injuries in the young athlete. Clin Sports Med 14: 503-516, 1995.

• 81 • Ozmun JC, Mikesky AE, and Surburg PR. Neuromuscular adaptations following prepubescent strength training. Med Sci Sports Exerc 26: 510-514, 1994.

• 82 • Payne VG, Morrow JR, Jr., Johnson L, and Dalton SN. Resistance training in children and youth: a meta-analysis. Res Q Exerc Sport 68: 80-88, 1997.

• 83 • Ramsay JA, Blimkie CJ, Smith K, Garner S, MacDougall JD, and Sale DG. Strength training effects in prepubescent boys. Med Sci Sports Exerc 22: 605-614, 1990.

• 84 • Sale DG. Neural adaptation to resistance training. Med Sci Sports Exerc 20: S135-145, 1988.

• 85 • Schmidtbleicher D and Gollhofer A. Neuromuskuläre Untersuchungen zur Bestimmung individueller Belastungsgrößen für ein Tiefsprungtraining. Leistungssport 12: 298-307, 1982.

• 86 • Sewall L and Micheli LJ. Strength training for children. Journal of pediatric orthopedics 6: 143-146, 1986.

• 87 • Skurvydas A and Brazaitis M. Plyometric training does not affect central and peripheral muscle fatigue differently in prepubertal girls and boys. Pediatr Exerc Sci 22: 547-556, 2010.

• 88 • Skurvydas A, Brazaitis M, Streckis V, and Rudas E. The effect of plyometric training on central and peripheral fatigue in boys. Int J Sports Med 31: 451-457, 2010.

• 89 • Sothern MS, Loftin JM, Udall JN, Suskind RM, Ewing TL, Tang SC, and Blecker U. Safety, Feasibility, and Efficacy of a Resistance Training Program in Preadolescent Obese Children. The American journal of the medical sciences 319: 370-375, 2000.

• 90 • Tanner JM. The measurement of maturity. Transactions European Orthodontic Society: 45-60, 1975.

• 91 • Tanner JM and Gibbons RD. Automatic bone age measurement using computerized image analysis. The Journal of pediatric endocrinology 7: 141-145, 1994.

• 92 • Tanner JM and Gibbons RD. A computerized image analysis system for estimating Tanner-Whitehouse 2 bone age. Hormone research 42: 282-287, 1994.

• 93 • Tanner JM, Hughes PC, and Whitehouse RH. Radiographically determined widths of bone muscle and fat in the upper arm and calf from age 3-18 years. Annals of human biology 8: 495-517, 1981.

• 94 • Thepaut-Mathieu C, Van Hoecke J, and Maton B. Myoelectrical and mechanical changes linked to length specificity during isometric training. J Appl Physiol 64: 1500-1505, 1988.

• 95 • Thorstensson A, Hulten B, von Dobeln W, and Karlsson J. Effect of strength training on enzyme activities and fibre characteristics in human skeletal muscle. Acta Physiol Scand 96: 392-398, 1976.

• 96 • Tsolakis C, Vagenas G, and Dessypris A. Growth and anabolic hormones, leptin, and neuromuscular performance in moderately trained prepubescent athletes and untrained boys. J Strength Cond Res 17: 40-46, 2003.

• 97 • Tsolakis CK, Bogdanis GC, Vagenas GK, and Dessypris AG. Influence of a twelve-month conditioning program on physical growth, serum hormones, and neuromuscular performance of peripubertal male fencers. J Strength Cond Res 20: 908-914, 2006.

• 98 • Vicente-Rodriguez G. How does exercise affect bone development during growth? Sports Med 36: 561-569, 2006.

• 99 • Vrijen J. Muscle strength development in the pre- and post-pubescent ages, in: Pediatric Work Physiology, Borms J and Hebbelinck M Ed. Basel, Switzerland: Karger, 1978, pp 152–158.

• 100 • Wathen D. Load assignment, in: Essentials of strength training and conditioning. TR Baechle, ed. Champaign, IL: Human Kinetics, 1994, pp 435-446.

• 101 • Weineck J. Biologie du sport. Paris: Vigot, 1992.

• 102 • Welday J. Should you check for strength with periodic max lifts? Scholastic Coach 57: 49-68, 1988.

• 103 • Weltman A, Janney C, Rians CB, Strand K, Berg B, Tippitt S, Wise J, Cahill BR, and Katch FI. The effects of hydraulic resistance strength training in pre-pubertal males. Med Sci Sports Exerc 18: 629-638, 1986.

• 104 • Wisloff U, Castagna C, Helgerud J, Jones R, and Hoff J. Strong correlation of maximal squat strength with sprint performance and vertical jump height in elite soccer players. Br J Sports Med 38: 285-288, 2004.

• 105 • Woollacott M, Debu B, and Mowatt M. Neuromuscular control of posture in the infant and child: is vision dominant? Journal of motor behavior 19: 167-186, 1987.



7

Comment développer sa force explosive ?

Sommaire

1 • Apports de connaissances 333

Introduction 333
Définition 333
Quels sont les critères de l'explosivité ? 337
Faut-il développer la force maximale ? 341
La qualité d'exécution,
nombre de répétitions en musculation 342
Un exemple de planification du travail explosif 343
Techniques et applications commentées 347
Un petit point sur le PaP 350
Conclusion 351

2 • Le coin des matheux 352

Pourquoi la puissance est égale à F x v ou W/t ? 352
De l'impulsion à l'explosivité 353

Bibliographie 357

1 • Apports de connaissances

Introduction

Force et endurance semblent être les 2 qualités mères de la préparation physique. Pourtant, d'après notre expérience, la qualité reine qui doit être adulée est sûrement **l'explosivité**. Il existe très peu de sport ne nécessitant pas cette dernière. Le principal attrait de l'entraînement est en général de rendre l'athlète plus explosif et parfois endurant à la répétition de son geste. Aussi, ce chapitre est sûrement le plus important à approfondir. Bien que vos auteurs proviennent des sports explosifs (sport de combat et gymnastique), s'il fallait visualiser 2 sports explosifs, nous penserions au javelot et au saut en hauteur. Ces 2 activités permettent de concevoir la définition même de l'explosivité.

Définition

Explosivité :

Capacité à produire la plus grande accélération sur soi-même ou sur un engin.

Vous devez soit être capable de propulser votre corps le plus puissamment possible, soit faire accélérer un objet le plus rapidement.
Pas de puissance explosive si :
- vous ne quittez pas le sol ;
- l'objet que vous tenez n'est pas propulsé.

Prenons l'exemple de 2 voitures aussi rapides en vitesse maximale : les 2 peuvent rouler à 200 km/h, mais la première met 25 secondes pour atteindre cette vitesse et la deuxième 15 secondes. La plus puissante, la plus explosive, est la deuxième. La notion d'accélération devient tout de suite plus concrète.

Contexte :

Sotomayor, avec ses 1,95 m et 98 kg, sauta 2,45 m en 1993. S'il fallait faire des comparaisons, nous pourrions prendre par exemple un insecte comme le Athous Haemorrhoidalis (ou taupin) qui, avec ces 2 cm et 40 milligrammes, peut sauter 30 cm. Un petit calcul donne une performance en hauteur de 29 mètres pour cet insecte. Le monde serait bien différent et nos super héros bien moins attrayants.

Qu'est-ce qui différencie principalement l'insecte de l'homme ? Ce coléoptère[22] possède une hyper-raideur de son tissu conjonctif. En effet, ce dernier arrive à déformer son squelette et le relâche telles les puces en plastique que nous possédions à l'école primaire (de lointain souvenirs pour certains).

Une application chez l'homme ? Oui et non. Oui, nous allons augmenter la raideur des muscles et tendons. Non, nous ne déformerons pas notre squelette au point de l'infléchir dangereusement ni ne nous servirons de ce dernier pour nos performances.

Savez-vous calculer une puissance ?

Rien de plus simple. Il faut déterminer :

- ***La force :*** $F = m \times a$ [1]

C'est-à-dire le produit de la masse par l'accélération, exprimée en kg/s/s ou kg/s² ou Newton, N.

- ***Le travail :*** $W = F \times d$ [2]

C'est-à-dire le produit d'une force par rapport à la distance sur laquelle elle a été appliquée, exprimé en Joule, J.

22 / Coléoptère : nom de l'ancien grec qui veut dire *koleos* "fourreau, étui" et de *pteron*, "aile". Fourreau, de l'ancien français *fouriel, forrel*, diminutif de *fuere* ("gaine"), de l'ancien bas francique *fôder* ("couverture"). Il est amusant de voir que "Coléoptère" peut ramener au mot "gaine", mais ses ailes le protègent ; le gainage est bien une fonction de protection en recouvrant et fortifiant des articulations.

De là vous obtenez :

- ***La puissance :*** $P = \frac{W}{t}$ [3]

(travail / temps) ou, dit autrement, le déplacement d'un corps (le vôtre ou un objet) à l'aide d'une force exprimée par rapport au temps. La puissance est exprimée en Newton par mètre et par seconde (N/m/s) ou joule par seconde ou Watt, W (ne pas confondre le W du travail et le W des watts). Mais alors d'où vient la relation que l'on voit dans beaucoup d'ouvrages ou revues selon laquelle la puissance est le produit de la force par la vitesse (P = F x V) ? Tout simplement de la façon dont on arrange les paramètres mécaniques dans la relation mathématique qui exprime la puissance. Nous en donnons l'explication en fin de chapitre pour ne pas effrayer les moins matheux d'entre vous, même si le passage de l'une à l'autre se fait tout en douceur (cf. p. 352-356).

Comparons deux sujets

	F = 220 x 9.8 = 2156 N W = 2156 x 1.12 = 2414,72 J P = 2414,72/3 = 804,91 W	F = 270 x 9.8 = 2646 N W = 2646 x 1.16 = 3069,36 J P = 3069,36/2.8 = 1096,2 W
	PIERRE	**BRUNO**
Poids	**70**	**90**
Charge en squat (92 % de RM)	**150**	**180**
Distance	**56**	**58**
Temps	**3 s**	**2,8 s**
Puissance ?	**804,91 W**	**1096,2 W**

L'intuitif peut nous amener dans l'erreur, seule la mesure objective (test ou résultat de compétition) apporte une valeur interprétable et fiable.

Il existe des appareils portatifs pour donner des valeurs d'accélération ou de puissance comme le Myotest®.

Anecdote de taille

En 2007, un jeune athlète de 23 ans devient champion du monde de saut en hauteur bien qu'il n'ait pratiqué cette discipline que 1 an ½. Il se nomme Donald Thomas ; basketteur d'origine, un ami lui conseille de faire du saut en hauteur suite à ses sauts d'une détente verticale impressionnante. Sa technique de saut est hors norme, non conventionnelle, mais surtout non académique : personne ne vous enseignerait cette manière de sauter. Ce qui relativise les croyances/certitudes que nous avons dans un domaine. Tout reste possible. Il saute bien plus près de la barre que n'importe qui, en l'air, il doit battre des jambes pour finaliser le saut (la rotation du corps afin d'éviter de percuter la barre). À sa première compétition, il saute 2,22 m, soit déjà bien plus que les meilleurs athlètes de certaines nations. Pis encore, avec sa technique "catastrophique", il saute bien plus haut que les techniciens de la discipline. À savoir que dans le sprint, la technique compte assez peu, mais dans le saut, elle est considérée comme indispensable. Il mesure 1,90 m et pèse 75 kg, et possède une détente verticale de 93 cm, valeur au-dessus des joueurs de la NBA dont la détente moyenne est de 67 cm.

Comment est-ce possible ? La génétique ?

Oui, les gastrocnémiens de Donald Thomas sont plus hauts que la moyenne et donc ses tendons sont très long (26 cm). Ne perdons pas de vue que la raideur du tissu conjonctif apporte le plus grand pourcentage de la force élastique de 5 à 10 fois supérieure à la force élastique musculaire pendant le passage de la phase excentrique à la phase concentrique du saut.

Stefan Holmes, médaillé olympique aux J.O. d'Athènes, mesure 1,81 m (20 cm de moins que les athlètes en général) ; il n'en reste pas moins le recordman des années 2000 avec 2,40 m. Son pied d'appel supporte une pression de 650 kg avec une course à 33 km/h. Des années d'entraînement et une capacité à transformer sa course en énergie (tendon 4 fois plus résistant que la normale) pour sauter en ont fait un athlète capable de compenser le don que la nature lui avait "retiré". Épisodes étonnants que leurs duels, Holmes ne performera plus par la suite et Thomas (record à 2,37 m) voulant imiter la technique de Holmes se blessera continuellement. La cheville de Holmes avait des années d'entraînement...

Quels sont les critères de l'explosivité ?

Nous serons peu originaux. En effet, il est fréquent de décrire l'explosivité à travers le CMJ ou Contre Mouvement Jump et nous allons faire de même. Il est parfait pour cet exercice de style.
Sur une plateforme de force, si un sportif exécute le CMJ ou saut pliométrique, le signal de la force en fonction du temps sera celui du schéma 1.

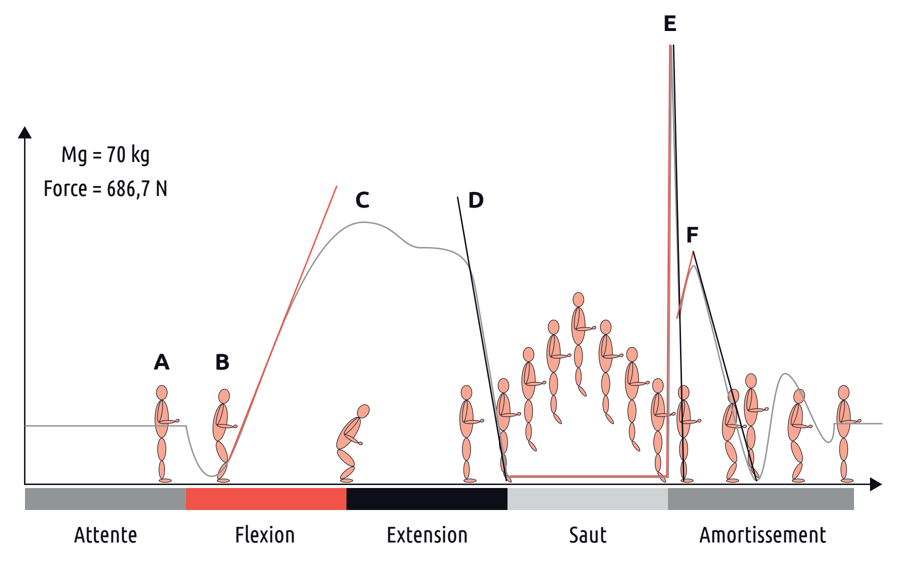


Figure 1 : Signal enregistré avec une plateforme de force lors un saut vertical avec contre-mouvement (CMJ)

4 phases principales sont identifiables :

Attente :
Cette partie n'enregistre rien, mais *in vivo*, sachez que l'individu doit penser à son saut, se concentrer, préparer le système nerveux à la suite.
Flexion :
Recherche de l'angle de flexion intuitif afin d'emmagasiner de la force élastique et, surtout, permettre aux muscles de s'activer grandement en augmentant la pression sur les membres inférieurs.

Extension :
Exploitation de la phase de flexion, recherche de la plus grande accélération.
Phase aérienne : résultante des 2 étapes précédentes.
Amortissement :
Recherche de stabilité en minimisant les impacts destructeurs sur le système musculo-squelettique.

Revenons plus en détail sur les lettres matérialisées sur le schéma.

A : Debout, juste avant de fléchir les genoux afin de prendre son élan.

B : Flexion rapide ; si vous tentez cette expérience sur un pèse-personne (car il n'est pas facile d'obtenir des plateaux de force), vous verrez l'aiguille descendre avant de la voir remonter rapidement. Diminution de la force au sol, se traduit par un allègement de la pression que vous exercez. *(Vous pouvez tenter l'expérience sur un pèse-personne sans chercher à décoller, l'atterrissage détruirait votre appareil).*

C : Instant important, c'est le point d'inversion du mouvement. Vous êtes au plus bas, il a fallu freiner cette "chute". Les muscles ont un recrutement d'unités motrices important, c'est le pic de force enregistré avant le saut. Plus vous descendez vite, plus vous devez freiner fort et normalement meilleur sera le saut. Entre B et C, nous avons matérialisé une pente rouge, c'est le taux de montée de la force, c'est celle-ci qu'il faudrait augmenter, par un travail excentrique.

D : Nous avons matérialisé le taux de chute de la force.

E : C'est le contact du sportif avec le sol, plus vous sautez haut, plus haut sera ce pic. Il ne traduit pas la force exprimée du sujet. Un objet lancé en l'air ferait également un pic de force.

F : Reprise de la fonction neuromusculaire : amortissement grâce aux facteurs neuromusculaires et aux propriétés mécaniques du corps humain.

La vitesse à laquelle on atteint sa vitesse maximale est donc un critère d'explosivité, c'est-à-dire que même sur un mouvement en isométrie maximale, nous pouvons déjà retrouver cette qualité.
La "mauvaise" méthode d'isométrie maximale consiste à prendre la barre de musculation et à la descendre jusqu'à un point que l'on maintient 4 ou

5 secondes. Nous sommes dans un travail certes productif en termes de force, mais pas optimal en termes de vitesse de recrutement et de synchronisation des unités motrices.
Siff le souligne dans son livre de référence sur la force avec les notions d'isométrie lente et rapide (13).
Si vous voulez créer sur le terrain de l'isométrie rapide, placez la barre dans l'angle voulu puis poussez le plus fort et le plus vite possible.

Pour les plus scientifiques

Jacques Quièvres voyait 5 façons d'exprimer l'explosivité :

Type I : la force explosive.
Dans la force appliquée au sol, il y a une composante d'accélération de la force (en Newton, N) appliquée au sujet (m.a). Il faut produire une force d'accélération au-delà de son poids pour parler de force explosive. La force au sol + la force exercée : m.G + m.a
La charge additionnelle n'est pas une bonne idée pour exprimer de la force explosive, le poids de corps est le meilleur moyen de s'élever haut, le bon sens le savait déjà.

Type II : TAF (taux d'accroissement de la force) ou ROFD ("rate of force development").
C'est le temps nécessaire à l'établissement de la force maximale en N/s. Mais c'est aussi une manière d'expliquer que même le travail isométrique peut exprimer une partie de l'explosivité par la force mesurée. Le freinage doit être le plus court possible.

Type III : TCF (Taux de chute de la force).
La force ne fait que diminuer car le corps a déjà de l'énergie pour quitter le sol. Pourtant, il faut être capable de pousser sur le sol plus rapidement que la capacité du corps à s'extraire de l'attraction terrestre. Juste avant cette chute, plus le sujet maintient de la force, plus le saut sera important.
Rapport de la force au temps, même valeur, en N/s. 42 000 N/s

Type IV : la raideur (élasticité des systèmes).
C'est l'allongement des chaînes musculaires et surtout des tendons qui nous intéresse ainsi que leur gainage. Réaligner son corps le plus rapidement possible, être le plus gaîné possible permet d'avoir la plus grande capacité à

exprimer de la force. Si les chaînes musculaires s'allongent trop, le résultat n'est pas au rendez-vous.

Les athlètes les plus gaînés gagnent en explosivité !

Type V : la puissance explosive.

La notion de puissance est la quantité d'énergie par unité de temps, c'est le watt qui s'exprime. Départ en starting-block, composante de force horizontale sans le poids.

Les valeurs du départ de start en sprint et les valeurs du squat jump (SJ) sont assez proches en puissance ; faire des SJ est certainement un bon moyen de travailler les départs lors d'une préparation physique.

Unité mécanique :

- Explosivité exprimée en watt pour la puissance cinétique.
- En termes de newton pour exprimer la force avec laquelle l'athlète de l'accélération.
- En termes de force par seconde pour prendre en compte la variation de la force par rapport au temps.
- En termes de force par mètre pour regarder la notion de raideur.

Faut-il développer la force maximale ?

La corrélation entre la force maximale et la vitesse est assez forte. Les sportifs les plus forts restent les plus rapides. Bien que corrélation ne soit pas raison, il faut tenir compte de ces statistiques sur les sportifs. Gardons en tête que les sportifs travaillant la force sans jamais développer de la force rapide ne sont pas explosifs. Les culturistes font partie de cette catégorie (par rapport à d'autres athlètes de même force). Le muscle n'est pas un simple élastique, c'est un système visco-élastique et contractile. Afin qu'il donne le meilleur de lui-même, il a besoin de "s'endurcir". Le tissu conjonctif qui le compose doit devenir plus raide (ce qui n'est pas l'opposé de la souplesse, voir le chapitre souplesse).
Miller, dans le livre "Entraînement de la force" (collection INSEP), mentionnait déjà les 4 secteurs intéressants en musculation et en voyait l'intérêt.

Tableau 1

Zone	% RM (repère)	Effets attendus
Z1 : Force	120 - 85	• Recrutement et synchronisation des UM (unités motrices). • Augmentation de la raideur du tissu conjonctif. • Travail avec de l'excentrique, de l'isométrique, des charges lourdes.
Transition	85 - 70	• Hypertophie (masse musculaire). • Pas assez lourd pour de la force, trop pour de la puissance… L'auteur en conclut que cette zone est inintéressante dans le développement de l'explosivité.
Z2 : Puissance Force	70 - 45	• Puissance maximale à dominante force. • Toujours chercher à donner l'intention de vitesse maximale bien que la charge reste lourde. Attention à ne pas descendre trop vite en excentrique. Le squat demandant de la maitrise technique, s'il le faut, utiliser les cadres guidés qui ont les mêmes résultats pour la qualité visée.
Z3 : Puissance Vitesse	45 - 30	• Puissance maximale à dominante vitesse.
Z4 : Puissance Vitesse	< 30	• Le secteur permettant de libérer le potentiel explosif et la capacité des muscles freinateurs à s'exprimer le plus tard possible mais également le plus fortement.

La qualité d'exécution, nombre de répétitions en musculation

Les vieilles habitudes ont la vie dure. Il est bien fréquent de voir dans les entraînements des séances initialement qualitatives transformées en séances d'endurance. Les charges étant légères, l'athlète commence par aller vite, et lorsque l'on est deux à se motiver, on continue les répétitions jusqu'à la fatigue. On repose la barre fière de soi et on récupère pour réitérer ce massacre.

Quel est le problème ?

L'explosivité, c'est une **bonne qualité musculaire**, mais c'est aussi une **action motrice précise.** Le cerveau possède un trajet pour faire une action, mais en cherche parfois une meilleure : c'est une méthode par "essai-erreur". Lors des premières répétitions, l'organisme est frais, vous activez l'ensemble de vos fibres musculaires de I à IIx en passant par les IIa. Un nombre exagéré de répétitions va entraîner la fatigue des fibres de type II et leur arrêt. L'apprentissage moteur, c'est la répétition, or qu'avons-nous le plus répété ? Des gestes lents. Il ne faut pas se laisser entraîner par l'envie d'en faire plus, c'est même l'inverse qui nous intéresse.

Avec un biofeedback lors des répétitions en musculation, un fait marquant revient chez tous les individus.

Exemple :

Votre RM1 est de 100 kg au développé couché, vous décidez de mettre 30 kg et d'aller le plus vite possible. À chaque répétition apparaît la puissance développée en watt, les 5 premières auront environ les mêmes puissances, la sixième accuse une chute notable, la septième encore plus. Pourtant, sans l'objectivité des chiffres, l'intuitif aurait fait continuer jusqu'à une fatigue à la limite de la qualité gestuelle.

L'expérience nous amène à la conclusion qu'il ne faut pas dépasser les 5 répétitions dans cet exemple.

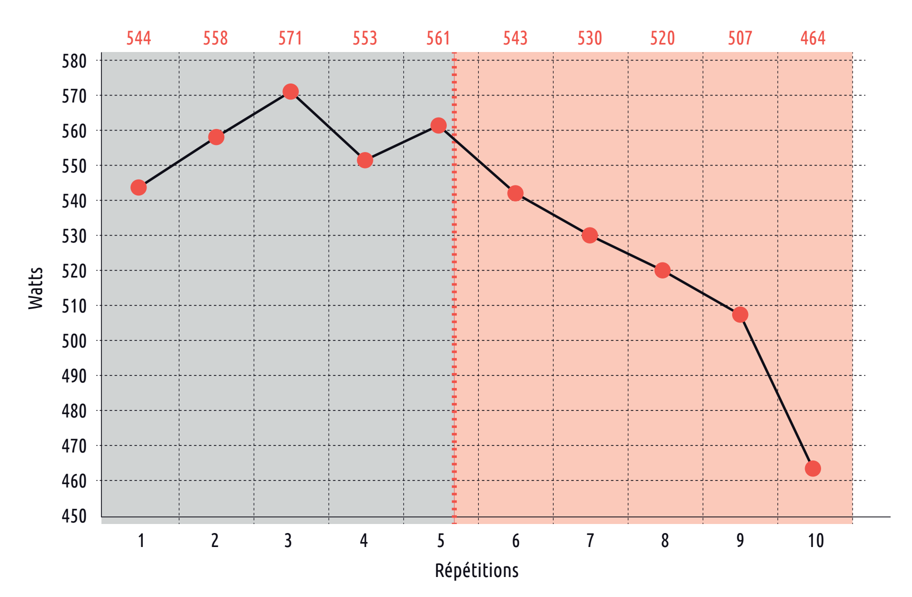


Figure 2 : Exemple d'enregistrements comptabilisant le nombre de répétitions et la qualité du travail effectué en puissance.

Un exemple de planification du travail explosif

Nous allons nous inspirer de l'excellent travail fourni par C. Baueur, C. Miller et J. Quivre lors de la préparation physique des sabreurs de l'équipe de France de 2001. Le rapport se trouve facilement sur la toile avec le titre "Effet d'un programme annuel de renforcement musculaire sur le développement des qualités musculaires des escrimeurs d'élite".
La lecture du document démontre la différence entre 7 personnes qui suivront le programme de musculation (méthode lourde) versus 6 autres qui feront le travail plus "classique".

Bien qu'il y ait 15 ans, il nous avait été expliqué que la musculation était aux antipodes de l'escrime et qu'elle serait nuisible aux qualités d'explosivité, ce travail a démontré l'inverse. Les 2 groupes ont progressé, mais davantage dans le groupe musculation. La France a été première au classement

mondial. Si les auteurs ont l'humilité de mentionner que leur travail n'est pas la seule raison de ce succès, il est évident qu'il y a contribué fortement. En qualité de préparateur physique, nous pouvons dire que l'inverse aurait été pointé du doigt et le responsable sûrement limogé.

Nous nous inspirons de ce travail depuis longtemps, aussi nous le présentons avec des adaptations personnelles. Tous les cycles font 4 semaines, exceptions du cycle 5 (une semaine) et du 6 (3 semaines).

Tableau 2 : Planification sur 9 cycles sur 32 semaines

CYCLE 1 : REPRISE D'ENTRAÎNEMENNT Mobiliser une charge sans recherche de vitesse, régime de contraction auxotonique.		
Intensité (% de RM)	60 %	• 2 séances par semaine durant 2 semaines. • 3 séances par semaine durant les 2 dernières semaines si besoin ou possible. • Utiliser des exercices globaux (squat, presse, développé couché, rowing horizontal, tirage banc…).
Nombre de répétitions	12	
Récupération	2 min	
Nombre de séries	3	

CYCLE 2 : PYRAMIDE MONTANTE EN PUISSANCE FORCE À vitesse maximale, habituer l'organisme aux charges lourdes, régime de contraction auxotonique		
Intensité (% de RM)	50 % + 60 % + 70 %	• 2 séances par semaine. • Mêmes exercices que le cycle 1.
Nombre de répétitions	Bloc de (8 + 6 + 4)	
Récupération	1 min au sein du bloc et 2 min inter séries	
Nombre de séries	3	

CYCLE 3 : FORCE MAXIMALE Régime auxotonique		
Intensité (% de RM)	92 %	• 2 séances par semaine. • Mêmes exercices que le cycle 1.
Nombre de répétitions	3	
Récupération	3 - 4 min	
Nombre de séries	3	

CYCLE 4 SINUSOÏDALE, SÉANCE 1 : LA FORCE EXPLOSIVE Intention d'accélération maximale, le jeté de barre		
Intensité (% de RM)	30 %	• 1 séance par semaine, pour la deuxième séance, voir ci-après. • Exercices se rapprochant davantage de l'activité (squat heiden, fentes, rowing horizontal avec un bras).
Nombre de répétitions	5	
Récupération	2 min	
Nombre de séries	3	

CYCLE 4 SINUSOÏDALE, SÉANCE 2 : LE STATO-DYNAMIQUE Charge moyenne mais mobilisation maximale Développement de la force et de la puissance		
Intensité (% de RM)	60 %	• La deuxième séance du cycle 4 utilise une méthode orientée développement de la force mais avec des charges plus légères afin de limiter les contraintes sur les muscles.
Nombre de répétitions	6	
Récupération	2 min	
Nombre de séries	3	

Pour le cycle 5 : 1 semaine seulement, séance en excentrique le lundi, séance effort dynamique 2 ou 3 jours après.

MICRO-CYCLE 5, UNIQUE SÉANCE PAR GROUPE MUSCULAIRE 1 FORCE SUPRA MAXIMALE Mobiliser une charge qu'il est impossible de lever, seul la partie excentrique (négative) est effectuée		
Intensité (% de RM)	105 % + 50 %	• Une seule fois, exercice à forte contrainte, limiter le nombre de séries.
Nombre de répétitions	Bloc (3 + 2)	
Récupération	1 min au sein du bloc, 3 min inter séries	
Nombre de séries	2	

MICRO-CYCLE 5, SÉANCE 2 DE LA SEMAINE EFFORT DYNAMIQUE, PUISSANCE MAXIMALE Mobiliser une charge moyenne le plus vite possible		
Intensité (% de RM)	50 %	• La deuxième séance est un rappel "nerveux" qualitatif.
Nombre de répétitions	6	
Récupération	3 min	
Nombre de séries	3	

Pour le cycle 6 : 3 semaines, une seule séance de musculation par semaine, il ne faut pas surcharger le système.

CYCLE 6 SÉANCE 1 : BULGARE ISOMÉTRIQUE MAXIMALE Mobiliser une charge sans mouvement puis relâcher le potentiel pour du travail explosif		
Intensité (% de RM)	150 % + < 20 %	• Une seule fois par semaine. • Cycle comportant moins de musculation, parfois, il y a du bon à laisser les muscles se "reposer". • Faire une séance d'automassage (voir le dernier chapitre), de piscine…
Nombre de répétitions	3 + 5	
Récupération	1 min au sein du bloc puis 3 min	
Nombre de séries	3	

CYCLE 7 : PYRAMIDE DESCENDANTE EN PUISSANCE VITESSE Créer un taux de montée de la force maximale et exploiter cette dernière à des fins explosives		
Intensité (% de RM)	60 % + 40 % + < 20 %	• 2 fois par semaine.
Nombre de répétitions	5 + 5 +5	
Récupération	1 min au sein du bloc, 2 min inter séries	
Nombre de séries	3	

CYCLE 8 : BULGARE "CLASSIQUE" Mobiliser une charge le plus vite possible en s'habituant à la recherche de l'accélération		
Intensité (% de RM)	80 % + 30 %	• Une fois par semaine. • La deuxième séance, voir tableau ci après.
Nombre de répétitions	3 + 5	
Récupération	30 sec au sein du bloc puis 2 min inter série	
Nombre de séries	3	

CYCLE 8 : SAUT PLIOMÉTRIQUE ET/OU LANCER PLIOMÉTRIQUE Mobiliser une charge le plus vite possible en s'habituant à la recherche de l'accélération		
Intensité (% de RM)	80 % + 30 %	• 1 fois par semaine.
Nombre de répétitions	3 + 5	
Récupération	30 sec au sein du bloc puis 2 min inter série	
Nombre de séries	3	

CYCLE 9 : BULGARE COMPLET (FORCE PUISSANCE EXPLOSIVITÉ) Rappel des qualités physiques		
Intensité (% de RM)	Bloc (90 % + 50 % + 30 %)	• 1 fois par semaine.
Nombre de répétitions	2 + 5 + 5	
Récupération	30 sec au sein du bloc puis 3 min	
Nombre de séries	3	

Techniques et applications commentées

Dans un premier temps, le travail explosif demande un développement de la force des agonistes (muscles qui effectuent le mouvement) et des antagonistes surtout en excentrique (muscles contraires au mouvement).

Attention, il ne faut pas consacrer trop de temps aux charges lourdes, ces dernières restent un travail lent, même si les fibres rapides sont concernées. Le travail explosif nécessite l'activation de fibres rapides "spécialisées" qu'il faut savoir **"réveiller" par un travail qualitatif.** Si tous les auteurs et surtout entraîneurs insistent sur ce point, ce n'est pas par excès de zèle.

Les adaptations de l'entraînement sont (adapté de Dufour, 14) :

- Réorganisation des patterns de recrutement musculaire.
- Un influx nerveux optimisé.
- Amélioration de l'excitabilité du motoneurone (neurone qui commande le muscle).
- Recrutement sélectif des fibres.
- Élargissement de la fibre motrice.

Pourquoi a-t-on mal au biceps lorsque l'on lance fort un objet à froid ? Qu'est-ce qu'un pattern moteur ?

Avez-vous déjà envoyé des cailloux le plus loin possible à la mer ou dans un lac à froid ? On se retrouve avec des douleurs au biceps alors que le principal extenseur est le triceps. N'oublions pas que le rôle des antagonistes (ici le biceps) n'est pas d'empêcher les agonistes de se contracter, mais ils sont présents pour maintenir l'intégrité de l'articulation (voir figure 3). Que se passerait-il dans notre coude sans la contraction du biceps ? Nous aurions lâché le caillou puis l'élan de l'avant-bras aurait mis une tension démentielle dans le coude entraînant sa fracture. Frapper dans le vide par erreur est déjà une situation dangereuse pour l'articulation. (Notons que l'agoniste se recontracte en phase finale pour stabiliser les tensions).

Un "pattern moteur" est une notion souvent utilisée en sciences du sport, née d'une métaphore informatique liée à la notion de programme (sélection par avance des opérations) (15). Cependant, l'évolution de nos connaissances nous a progressivement fait passer au concept de "stratégie" motrice car un pattern peut être modulé en fonction de la tâche à réaliser et du contexte dans lequel elle se déroule (16-20). Les groupes musculaires, les intensités et le timing des contractions musculaires sont organisés par avance et modulés suivant les circonstances. C'est aussi lié à l'apprentissage : obtenir un nouveau pattern moteur plus efficace, c'est répéter un geste de qualité. Même si le sportif est sur une habileté motrice globale, gardons en tête que la répétition jusqu'à la fatigue est source d'apprentissage d'un mauvais "pattern moteur".

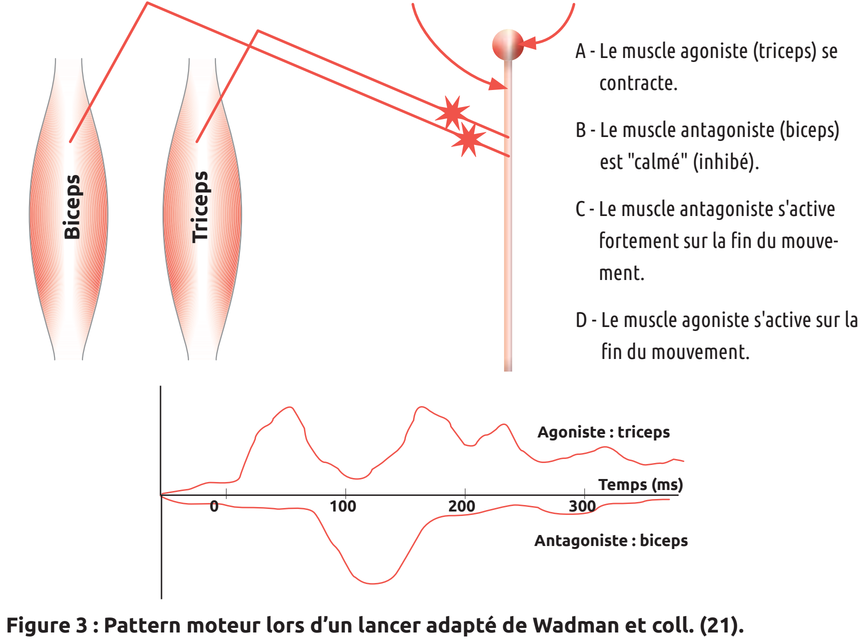


Figure 3 : Pattern moteur lors d'un lancer adapté de Wadman et coll. (21).

Tableau des méthodes et explications

Le travail en contraste de charge (appelé méthode Bulgare) et la PaP (Postactivation potentiation)	
Travail Bulgare ou par contraste	• (3 reps 85 % + 5 reps 30 %) X (nombre de séries avant la fatigue). • R = 3 minutes. • 3 répétitions à 85 % (pas de RM, pas de fatigue.
Méthode PaP	• 4 reps (110%), r = 1 min, geste explosif. • 4 répétitions partielles hautes (toute petite amplitude) à 110 % de la RM (c'est possible vu l'amplitude très réduite). • Reposez la barre puis dans la minute qui suit, tentez un geste explosif.
• Méthode Bulgare et méthode PaP ont pour effet d'améliorer la production de force et de puissance. • Bien que l'effort physique induise une fatigue, s'il est correctement dosé, nous pouvons espérer profiter d'adaptations transitoires (un peu comme l'échauffement).	
Pré-contraction antagoniste	• 6 reps 85 % (dorsaux) + 5 reps 30 % (pectoraux).

<table>
<tr><td colspan="2">• Les charges lourdes "fatiguent" les muscles et les limitent dans leurs actions freinatrices. Avez-vous connu les méthodes agonistes-antagonistes ?
Il suffit d'enchaîner des développés militaires avec des tractions à la barre fixe pour comprendre cette sensation de légèreté et parfois obtenir une ou deux répétitions supplémentaires.
• Action pas toujours démontrée mais elle permet au moins de travailler les antagonistes en méthodes lourdes.</td></tr>
<tr><td>Antagoniste excentrique</td><td>• 6 répétitions 55 % x 3 à 5 séries.
• 6 répétitions à 50 % phase excentrique "laxe" dans un premier temps et importante dans la partie finale du mouvement.</td></tr>
<tr><td colspan="2">• Très difficile à exécuter, être assisté d'un professionnel dans un premier temps ; il s'agit par exemple, en rowing horizontal, de laisser les poids entraîner vos bras (en partant en position statique proche de la poitrine) et de ne contracter que sur les derniers instants du mouvement. Ainsi, vous pratiquez un exercice excentrique sur l'angle final du mouvement comme lors d'un lancer.</td></tr>
<tr><td>L'explosif "pure"</td><td>[(1 rep 30 % x 5) r = 10 secondes] x (nombre de séries avant la fatigue) R = 3 minutes</td></tr>
<tr><td colspan="2">• Il est question ici d'effectuer des gestes de qualité. Parfois, l'athlète peut être frustré s'il n'est pas prévenu que l'objectif est la performance et non de terminer l'exercice en sueur, prêt à s'évanouir. Il n'est pas recherché une congestion.</td></tr>
<tr><td>Squat Jump et Long Jump (en détente pure ou concentrique pur)</td><td>• En position statique fléchie, sauter le plus haut possible (jump) ou le plus loin (long).</td></tr>
<tr><td colspan="2">• Exercice plus intéressant pour la force explosive de départ, la puissance musculaire n'est pas augmentée de manière conséquente.</td></tr>
<tr><td>La pliométrie</td><td>• Toutes les formes de bondissement avec temps de contact courts.</td></tr>
<tr><td colspan="2">• De nombreux ouvrages sont consacrés aux exercices pliométriques, gardez en tête de ne pas rechercher une fatigue importante.</td></tr>
</table>

Un petit point sur la PaP

La "postactivation potentiation" (PaP) avait en premier lieu été appelée en Français la pré-activation pour expliquer que c'était une mise en train avant l'exercice. Les revues de musculation ont appelé cela tout de suite la postactivation pour dire que nous étions activés après l'exercice. Dans la littérature scientifique, le terme postactivation potentiation est plus présent.

Les gains dus à la PaP sont liés à 3 mécanismes possibles (22-27) :

- Suite à l'exercice important dans l'intensité de la contraction, de plus en plus d'ions Ca2+ sont libérés depuis le reticulum sarcoplasmique, la sensibilité de l'interaction actine-myosine s'intensifie, ce qui modifie la structure de la tête de myosine et entraîne un niveau plus fort de génération de force de pontage (création de lien entre la tête de myosine et l'actine).
- Le recrutement des unités motrices peut être accru par l'augmentation du potentiel d'excitation due aux contractions musculaires précédentes. Cette excitation, qui peut durer plusieurs minutes, résulte en une force générée augmentée.
- Les contractions musculaires précédentes peuvent réduire l'angle de pennation des fibres musculaires, permettant une plus fidèle force de transmission lors des contractions suivantes.

Les gains de force sont dus également à une augmentation des neurotransmetteurs. Bien d'autres pistes ne sont pas encore élucidées.

Très important, lors du travail Bulgare (contraste lourd léger), nous avions tendance à décharger rapidement les poids sous prétexte de perdre les bénéfices de la PaP. Certains auteurs estiment que cette dernière est présente durant 18 min, d'autres démontrent que 4 à 11 min sont effectives. Un auteur considère cette action à une minute (mais c'était sur l'adducteur du pouce, ce muscle récupère peut-être différemment des autres, plus imposants).

Conclusion

L'explosivité est du domaine qualitatif. Cette qualité, avec la vitesse, doit être soignée. Un travail d'endurance explosive pourrait être un oxymore, pourtant, les sports collectifs et bien d'autres ont cette problématique. Nous ne pouvons que conseiller le développement de l'explosivité et de travailler le développement du $\dot{V}O_2$max. Ne pas confondre l'endurance et le $\dot{V}O_2$max, c'est ce dernier qu'il est nécessaire de travailler. Rappelez-vous, le secteur explosif est bref, c'est la phosphorylcréatine le substrat de cette qualité, mais c'est aussi les mitochondries qui sont capables de les resynthétiser.

2 • Le coin des matheux

Pourquoi la puissance est égale à *F x v* ou *W/t* ?

Passer de l'une à l'autre

Cette égalité des 2 relations permet de comprendre la notion d'impulsion et d'explosivité.
L'équation [3] exprime la puissance en utilisant travail et temps :

$$P = \frac{W}{t} \quad \text{[eq.1]}$$

On sait que le travail relie la force et la distance du déplacement de l'objet pendant que la force est appliquée :

$$W = F \times d \quad \text{[eq. 2]}$$

Si on remplace W [eq.2] par sa valeur dans l'équation 1, on obtient :

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \times d}{t} \quad \text{[eq. 3]}$$

Puis la vitesse est l'expression d'une distance parcourue en un temps donné (***v = d/t***), il vient tout naturellement :

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \times d}{t} = F \times \frac{d}{t} = F \times v \quad \text{[eq. 4]}$$

Et voilà, on y est ! Nous obtenons le fameux : P = F x v, connu aussi sous le nom de relation puissance-vitesse.
Relation masse-accélération-force.
Maintenant, analysons les choses un peu différemment.
Reprenons notre corps. Il ne bouge pas. Sa vitesse est nulle puisqu'aucune force ne le fait bouger. Pour le faire bouger et lui donner une certaine vitesse, il faudra appliquer une force qui serait fonction de la masse de mon corps. La relation entre ces deux grandeurs, accélération et force, est donnée par :

$$F = m \times a \leftrightarrow a = \frac{F}{m} \leftrightarrow m = \frac{F}{a} \quad \text{[eq. 5]}$$

Comme la masse de notre corps ne change pas (***m = constante***), il va se produire une sorte de vase communiquant entre ***a*** et ***F*** (figure 3).

La Figure 4 montre les relations a – F et a – m. La relation F – m (non dessinée) montre que pour une même accélération finale, la force appliquée à un corps sera d'autant plus importante que sa masse est élevée.

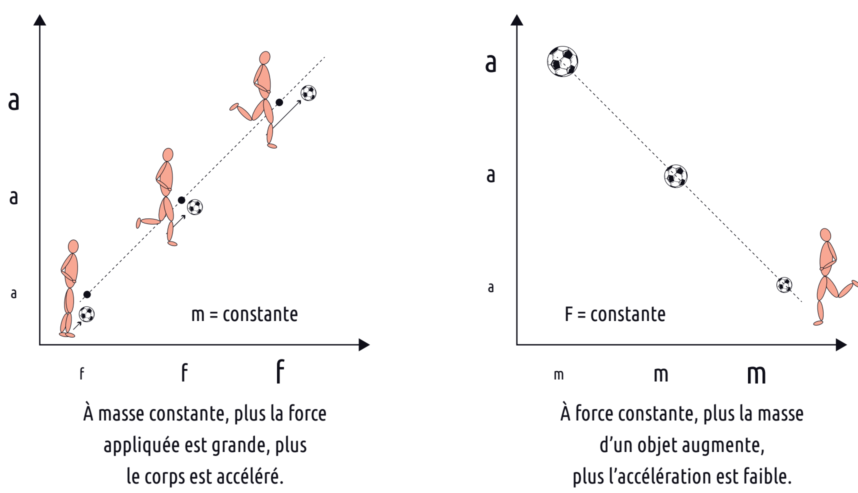


Figure 4 : Relation entre force, accélération et masse. D'après Kreighbaum et Barthels (1990).

De l'impulsion à l'explosivité

Maintenant, on va imaginer que nous pouvons mesurer la quantité de mouvement, ***P***, d'un corps à partir de sa masse et de sa vitesse :

$$P = m \times v \text{ [eq. 6]}$$

Quand on applique une force à un corps, sa vitesse change, elle ne reste pas constante. On note ce changement avec la lettre minuscule ***d*** pour signifier une petite variation :

$$P = m \times dv \text{ [eq. 7]}$$

Si ***dv = 0***, cela signifie que le corps est immobile ou qu'il se déplace à vitesse constante, un peu comme si vous étiez à l'arrêt avec une voiture ou si vous rouliez à 130 km/h sur l'autoroute avec le régulateur de vitesse.

Si ***dv <> 0*** , c'est que la quantité de mouvement varie, que le corps n'est ni immobile, ni à vitesse constante. Avec ***dv > 0***, on aura une accélération et avec ***dv < 0*** une décélération. Puisque cette variation de quantité de mouvement est mesurée par rapport au temps, on peut mesurer la variation de quantité de mouvement entre le début et la fin de l'application de la force (ou de l'accélération) :

$$dP = m \times \left(\frac{v_{fin} - v_{début}}{t_{fin} - t_{début}}\right) = m\,x\,\frac{dv}{dt} \text{ [eq. 8]}$$

On retrouve tout à coup une forme plus générale que l'on connaît :

$$dP = m \times \frac{dv}{dt} = m \times a = F \text{ [eq. 9]}$$

La variation de quantité de mouvement d'un corps est donc bien l'accélération qui lui est appliquée, donc la force. Reprenons cette formule :

$$dP = F = m \times \frac{dv}{dt} \text{ [eq. 10]}$$

On réarrange les termes pour ne garder que la quantité de mouvement à droite :

$$F \times dt = m \times dv \text{ [eq. 11]}$$

Et on peut maintenant dire ce qu'est une impulsion : c'est la variation de quantité de mouvement du corps qui se produit lorsqu'une force agit sur lui. On mesure l'impulsion en regardant comment la quantité de mouvement varie pendant que la force agit sur le corps :

$$F\,(t_{fin} - t_{début}) = m \times (v_{fin} - v_{début}) \text{ [eq. 12]}$$

D'une façon plus juste mathématiquement, on dit que c'est le calcul de "l'intégrale" (on prend en compte tout ce qui s'est passé entre le début et la fin) de la force qui va déterminer la quantité de mouvement finale. On l'écrit comme suit :

$$\int F\,dt = mv \text{ [eq. 13]}$$

De là, découle toutes les comparaisons que nous avons déjà évoquées concernant la puissance musculaire. Mais on a une approche plus fine avec cet angle d'attaque.

Prenons un exemple :

Vous vous apprêtez à taper dans un ballon au sol. Votre pied et le ballon n'ont aucune vitesse. Ils sont immobiles. Vous prenez de l'élan avec votre jambe et vous tapez dans le ballon. La microseconde qui précède le contact de votre pied avec le ballon est le point de départ qui nous intéresse. Le contact se fait et vous appliquez toute votre force pendant un certain moment sur le ballon jusqu'à ce qu'il quitte votre pied. Entre-temps, il s'est déformé sous la force d'impact puis a retrouvé sa forme originelle avant de partir.
En mesurant ce qui se passe entre le moment ❶ où votre pied entre en contact avec le ballon (t_{fin}) et le moment ❸ où il quitte votre pied à toute vitesse ($t_{début}$), on obtient la courbe suivante (figure 5) :

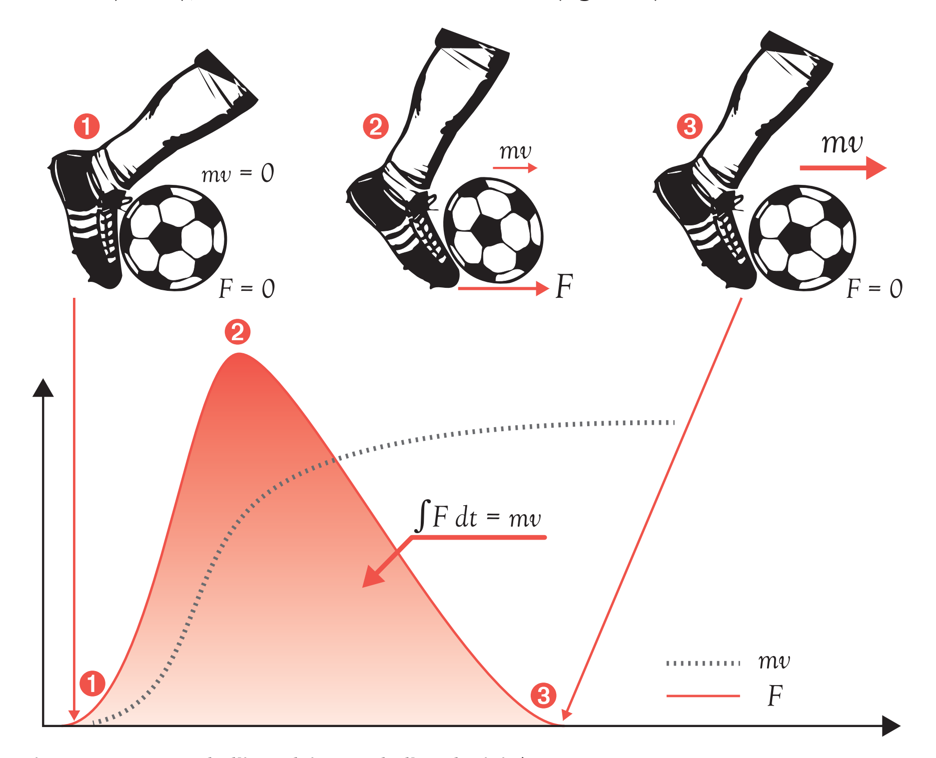


Figure 5 : Mesure de l'impulsion et de l'explosivité.

Un microseconde avant ❶, c'est-à-dire avant que votre pied entre en contact avec le ballon, la force d'interaction entre le ballon et votre pied est égale à 0. Puis le contact se produit et vous pouvez commencer à faire varier la quantité de mouvement du ballon. De nulle au départ (❶), elle va atteindre un maximum au moment où il quitte votre pied, c'est-à-dire le moment où vous n'avez plus la possibilité d'exercer une force sur lui (❸). C'est à ce moment-là que le ballon est à sa vitesse maximale, donc sa plus grande quantité de mouvement.

Entre ces 2 moments, on a mesuré la variation de la force par rapport au temps en calculant l'aire qui se trouve sous la courbe rouge : c'est l'intégrale. Plus l'intervalle de temps choisi pour faire la mesure est petit, plus la valeur obtenue sera précise. On voit qu'elle augmente puis diminue, que la force passe par un maximum (❷) puis diminue. À partir de ces notions, on peut comparer deux athlètes (Figure 6).

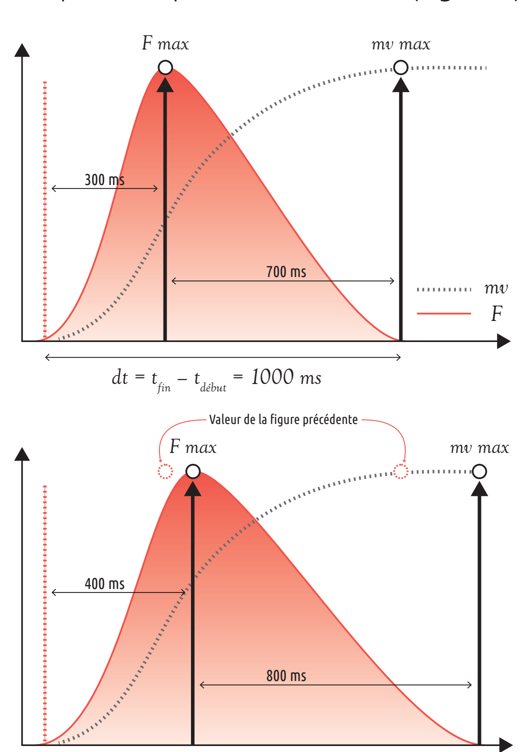


Figure 6 : Comparaison des phases du mouvement au niveau temporel entre 2 sujets : en haut le sujet explosif, en bas le sujet moins explosif.

Bibliographie

• 1 • PiazzesiG, Reconditi M, Linari M, Lucii L, Bianco P, Brunello E, Decostre V, Stewart A, Gore DB, Irving TC, Irving M, Lombardi V. Skeletal muscleperformance determined by modulation of number of myosin motors rather than motor force or stroke size.

• 2 • Brunello E, Reconditi M, Elangovan R, Irving M, Lombardi V, Linari M, Sun YB, Narayanan T, Panine P, Piazzesi G. Skeletal muscle resist stretch by rapid binding of second motor domain of myosin to actin. (Proc Natl Acad Sci USA 2007 déc 11; 104(50): 20114-9)

• 3 • Abott BC, Bigland B, Ritchie JM. The physiological cost of negative work.

• 4 • Kitamura K, Tokunaga M, Iwane AH, Yanagida T. A single myosin head moves along an actin filament with regular steps of 5.3 nanometres. Nature 99 Jan 14.

• 5 • Sale DG. Postactivation potentiation: role in human performance. Exerc Sport Sci Rev. 2002;30:138-143.

• 6 • Baudry S, Duchateau J. Postactivation potentiation in a human muscle: effect on the rate of torque development of tetanic and voluntary isometric contractions. J Appl Physiol. 2007;102:1394-1401.

• 7 • Chu D. Explosive Power and Strength: Complex Training for Maximal Results. Champaign,

• 8 • IL: Human Kinetics; 1996.

• 9 • Docherty D, Robbins DW, Hodgson M. Complex training revisited: a review of its current status as a viable training approach. Strength Cond J. 2004;26:52-61.

• 10 • Gullich A, Schmidtleicher D. MVC-induced short term potentiation of explosive force.

• 11 • N Stud Athl. 1996;11:67-81.

• 12 • Esformes JI, Bampouras TM.Effect of back squat depth on lower body post-activation potentiation. J Strength Cond Res. 2013 Feb 25.

• 13 • Siff MC. Supertraining. Ed. Supertraining Institute, 2003, 498 pages.

• 14 • Dufour M. Les diamants neuromusculaires. Chavéria : Ed. Volodalen, 2009, 174 pages.

• 15 • Keele SW. Movement control in skilled motor performance. Psycho1 Bull. 70:387-403, 1968.

• 16 • Morris ME, Summers JJ, Matyas TA and Iansek R. Current Status of the Motor Program. Phys Ther. 74:738-748, 1994.

• 17 • Gottlieb GL. Muscle activation patterns during two types of voluntary single-joint movement.J Neurophysiol. 80:1860-1867, 1998.

• 18 • Scott SH. Optimal strategies for movement: success with variability. Nat Neurosci. 5:1110–1111, 2002.

• 19 • Scott SH. Inconvenient truths about neural processing in primary motor cortex. J Physiol. 586:1217-1224, 2008.

• 20 • Ingram JN, Wolpert DM. Naturalistic approaches to sensorimotor control. Prog Brain Res. 191:3-29, 2011

• 21 • Wadman W J, Dernier van Dergon, JJ, Geuze RH, Mol CR. Control of fast goal-directed arm movements.J. Hum. Mov. Stud.5: 3–17, 1979.

• 22 • Sale DG. Postactivation potentiation: role in human performance. Exerc Sport Sci Rev. 30:138-143, 2002.

• 23 • Bishop D. Warm up I: potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. Sports Med. 33:439-454, 2003.

• 24 • Behm DG. Force maintenance with submaximal fatiguing contractions. Can J Appl Physiol. 29:274-290, 2004.

• 25 • Robbins DW. Postactivation potentiation and its practical applicability: a brief review. J Strength Cond Res. 19:453-58, 2005.

• 26 • Ebben WP. A brief review of concurrent activation potentiation: theoretical and practical constructs. J Strength Cond Res. 20:985-991, 2006.

• 27 • Macintosh BR, Robillard ME, Tomaras EK. Should postactivation potentiation be the goal of your warm-up? Appl Physiol Nutr Metab. 37(3):546-550, 2012.



8

Comment développer sa vitesse ?

Sommaire

1 • Introduction 361

La vitesse 361
Définition de la vitesse 361
Le 100 m, une brève histoire rapide
et les embûches associées 362

2 • Biomécanique de la vitesse 369

De la marche au sprint 369

3 • Décomposition de la vitesse pour l'entraînement 377

Les différentes étapes et facteurs 377
Le départ et le temps de réaction 377
L'accélération, la vitesse et la fréquence gestuelle,
exemple des sports collectifs 379
La vitesse maximale 382
Le maintien de la vitesse et la décélération ; l'énergétique 383

Bibliographie 385

1 • Introduction

La vitesse

La vitesse renvoie inéluctablement sur la discipline du 100 mètres en athlétisme lorsqu'on mentionne son nom. Les comparaisons fusent, tel athlète de bobsleigh vaut tant au 100 mètres, ce joueur de foot vaut tant, cet athlète de rugby vaut "temps" au 100 mètres, devrions-nous dire.

Pourquoi tant d'émois devant cette discipline ? Nous pourrions presque dire qu'elle est d'actualité car avec internet, nous voulons tout, tout de suite et très vite. Le 100 mètres, c'est dix secondes d'attente d'une confrontation peu compliquée pour le public. Le saut en longueur n'arrive pas à la même atmosphère. Si, un jour, nous voyions huit couloirs avec une fosse de sable par couloir, nous pourrions peut-être imaginer un attrait différent. L'aspect compétitif est primordial, pourquoi les athlètes ne font pas 100 mètres seul comme dans d'autres épreuves ? La compétition est à son paroxysme avec seulement dix secondes d'attente. En préparation physique, même à l'entraînement, si vous voulez du "chrono", vous disposez les sportifs en adversité, le côté pratique étant le facteur limitant (comme le saut en longueur).

Dans le cadre d'un manuel consacré à la préparation physique, nous n'orienterons pas uniquement le chapitre sur le 100 mètres, mais nous allons l'utiliser afin d'en sortir les informations utiles à la vitesse en général pour tous.

Définition de la vitesse

La définition du dictionnaire est souvent sommaire et efficace, mais elle ne nous parle pas toujours sur le terrain.

Vitesse : rapport d'une longueur par un temps. Unité du système international : le mètre par seconde ($m.s^{-1}$).

Nous utiliserons celle-ci :

Vitesse : faculté de faire parcourir à son corps ou à ses membres la plus grande distance dans un temps donné ou d'effectuer le temps le plus court sur une distance donnée.

L'épreuve du 100 mètres entre dans la définition, la distance est connue, le temps est l'invité surprise. Imaginons l'inverse, un temps (dix secondes) et une distance inconnue que mesurerait un laser. Nous aurions au moins l'avantage de ne plus voir les athlètes freiner avant la ligne d'arrivée.

Le 100 mètres, une brève histoire rapide et les embûches associées

Le sprint est une discipline olympique "reine" qui ne s'est pas toujours courue sur cette distance. Passé du stadion (la longueur du stade d'Olympie ; 192,27 mètres soit 600 fois la longueur du pied d'Héraclès) au 100 yards (91,44 mètres) à Oxford, le renouveau des J.-O. fait apparaître le 100 mètres.

Évolution des records du monde du 100 mètres

10.6	Donald Lippincott	USA	Juillet 1912
10.4	Charles Paddock	USA	23 avril 1921
10.3	Percy Williams	Canada	9 août 1930
10.2	Jesse Owens	USA	20 juin 1936
10.1	Willie Williams	USA	3 août 1956
10.0	Armin Hary	RFA	21 juin 1960
9.99	Jim Hines	USA	20 juin 1968
9.95	Jim Hines	USA	14 octobre 1968*
9.93	Calvin Smith	USA	3 juillet 1983
9.92	Carl Lewis	USA	24 septembre 1988
9.90	Leroy Burrell	USA	14 juin 1991
9.86	Carl Lewis	USA	25 août 1991
9.85	Leroy Burrell	USA	6 juillet 1994
9.84	Donovan Bailey	Canada	27 juillet 1996
9.79	Maurice Greene	USA	16 juin 1999
9.77	Asafa Powell	Jamaïque	14 juin 2005
9.77	Justin Gatlin	USA	12 mai 2006
9.77	Asafa Powell	Jamaïque	11 juin 2006
9.74	Asafa Powell	Jamaïque	9 septembre 2007
9.72	Usain Bolt	Jamaïque	31 mai 2008
9.69	Usain Bolt	Jamaïque	16 aout 2008
9.58	Usain Bolt	Jamaique	17 aout 2009

* Apparition du chronomètre électronique.

Tableau 1 : Évolution des records du monde de vitesse au 100 mètres.

Quelques informations insolites

- Le sprinter Bulgare Georgi Kirilov Georgiev s'est plié le genou lors des championnats d'Europe à Helsinki en Finlande.

- Le "sprinter" Sogelau Tuvalu (Îles Samoa), lors des qualifications aux championnats du monde à Daegu (Corée du Sud), fait un chrono de 15,66 secondes avec un temps de réaction de 0.269 secondes. Parfois, de "nouvelles nations" sont invitées, il est possible de proposer des athlètes même si les minima ne sont atteints. L'athlète en question s'est préparé un mois et demi, ne possède pas de chaussures avec crampons et fait le double de poids de ses rivaux.

- La finale des J.-O. de 2012 reste sans doute la plus rapide du monde mais aussi la plus surprenante : sur le podium, deux des trois finalistes sont déjà tombés pour dopage. Trois mois de suspension pour Yohan Blake et quatre ans pour Justin Gatlin. 12 % des médaillés de Londres font partie des athlètes de "la seconde chance", certains reviennent meilleurs qu'avant.

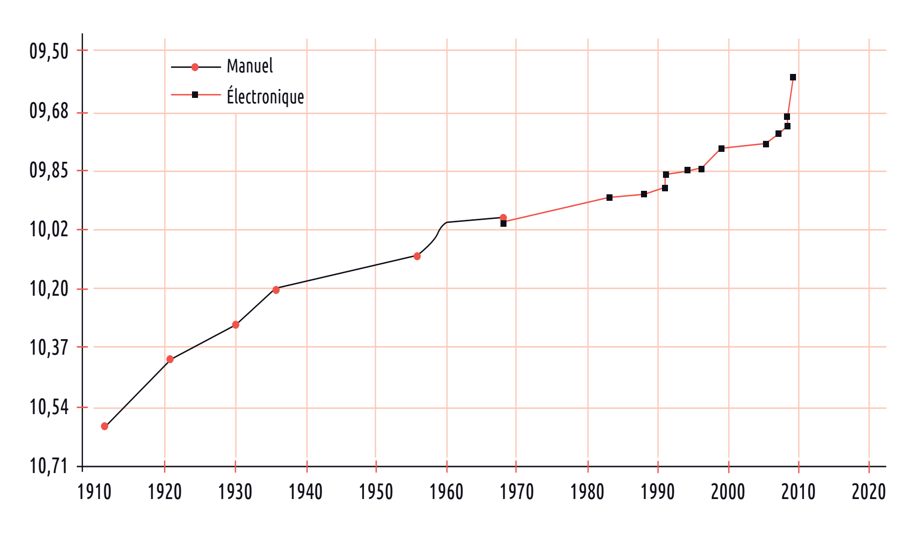


Figure 1 : Représentation graphique de l'évolution des records au 100 mètres.

L'évolution des records a des limites spéculatives que la science tente de publier régulièrement. Avec un vent dans le dos à la limite homologable, une course à Mexico et une prolongation de vitesse, peut-on envisager moins de 9,40 secondes ? Nous préférons observer les compétitions de sprint, contribuer au développement et apprécier la performance des meilleurs plutôt que de les prévoir sans intérêt au final.

Au sommet de cette évolution, Usain Bolt, né le 21 août 1986, 1,96 m pour 86 kg, chaussant du 47. Il possède des foulées de 2,70 mètres (de 20 à 30 centimètres de plus que ces rivaux), 41 foulées pour le 100 mètres, a une vitesse de pointe à 44,72 km/h mais une vitesse moyenne de 37,58 km/h. Sa vitesse la plus rapide est obtenue entre les 60 et 70 mètres (12,35 m/s sur les 10 mètres soit une moyenne de 44,46 km/h). Suite aux prédictions possibles, nous citerons le roi : "Je pense que tout est possible. Je sais que je peux courir en 9,40 secondes. Je pense que je m'arrêterai à ce chrono".

Pour information : une foulée est le cycle complet entre les deux appuis du même pied.

Distance	Temps	Vitesse m/s	Vitesse km/h	Amplitude	Nombre de foulée
100	9''58	10,44	37,58	2,50 à 2,70	41
400	43''18	9,26	33,35	2.40	166
800	1'40''91	7,93	28,54	2,10	380
1500	3'26'00	7,28	26,21	2	750
5000	12'37''35	6,60	23,77	1.8	2777
10 000	26'17''53	6,34	22,82	1,75	5714
Marathon	2h03'38	5,69	20,48	1,60	26371,8

Tableau 2 : Comparaison de différentes foulées.

	Ben (88)	Carl (88)	Mo (99)	Mo (01)	Tim (02)	Asafa (05)	Bolt (08)	Bolt (09)
RT	0,132	0,136	0,162	0,132	0,104	0,15	0,165	0,146
0-10	1,83	1,89	1,86	1,83	1,89	1,89	1,85	1,89
10-20	1,04	1,07	1,03	1	1,03	1,02	1,02	0,99
20-30	0,93	0,94	0,92	0,92	0,91	0,92	0,91	0,9
30-40	0,86	0,89	0,88	0,89	0,87	0,86	0,87	0,86
40-50	0,84	0,86	0,88	0,86	0,84	0,85	0,85	0,83
50-60	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,85	0,82	0,82
60-70	0,84	0,85	0,83	0,83	0,84	0,84	0,82	0,81
70-80	0,85	0,85	0,86	0,86	0,84	0,84	0,82	0,82
80-90	0,87	0,86	0,85	0,89	0,85	0,85	0,83	0,83
90-100	0,9	0,88	0,85	0,91	0,88	0,85	0,9	0,83
Time	9,79	9,92	9,79	9,82	9,78	9,77	9,69	9,58

Tableau 3 : Analyse du 100 m par fractions de 10 m.

Ce tableau montre différents sprinters (Ben Johnson, Carl Lewis, Maurice Greene, Tim Montgomery, Asafa Powell et Usain Bolt. RT est le temps de réaction, comme nous le verrons plus tard, ce n'est pas le point le plus important du sprint, mais il ne faut pas le rater ou trop l'anticiper. Les vitesses maximales sont atteintes de 50 m et à 80 m. Le maintien de vitesse de Bolt est de 30 m avec le plus mauvais temps de réaction et sa performance déjà incroyable de l'époque en 9,69 !

Distance	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
Temps	1,89	2,88	3,78	4,64	5,47	6,29	7,10	7,92	8,75	9,58
Temps sur 10 m	1,89	0,99	0,9	0,86	0,83	0,82	0,81	0,82	0,83	0,83
Vitesse en m/s	5,29	10,1	11,11	11,63	12,05	12,2	12,35	12,2	12,05	12,05
Vitesse en km/h	19,04	36,36	39,97	41,87	43,38	43,92	**44,46**	43,92	43,38	43,38

Tableau 4 : Analyse de la meilleure performance mondiale d'Usain Bolt

Durant 70 mètres, Bolt court à plus de 40 km/h et possède les derniers 50 mètres les plus impressionnants jamais enregistrés. Pour information, sur 200 mètres, il court le 100 mètres en 8,84 secondes entre les 50 mètres et les 150 mètres.

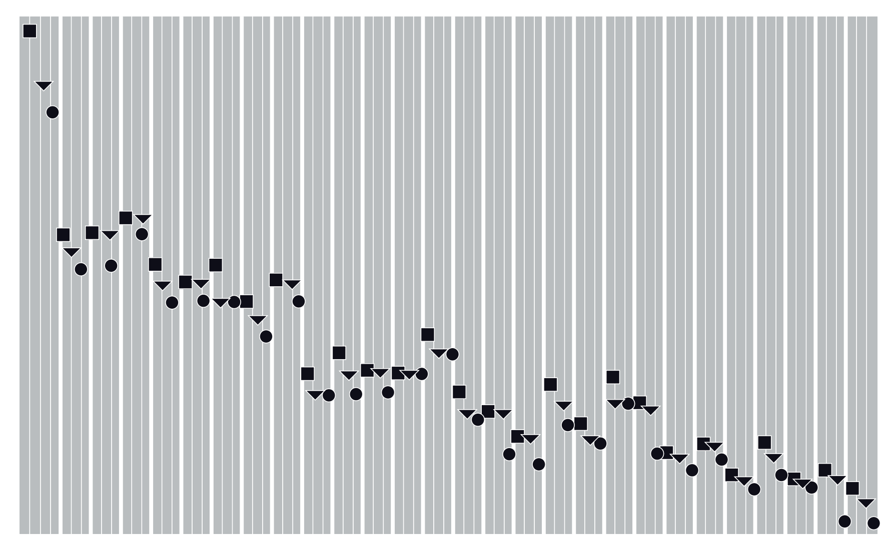


Figure 2 : Adaptation de la vidéo 3D des finales du 100 mètres au J.-O., représentation des trois premiers temps.

La figure 2 est une comparaison de toutes les finales des J.-O. de 1896 à 2012 et montre la place des trois premiers par rapport à un temps de référence, la performance de Bolt à Londres. Lorsqu'il franchit la fameuse ligne, les anciens champions ont encore pas mal de distance à parcourir. C'est une manière élégante de représenter plus d'un siècle de finales olympiques, de démontrer que la sélection des talents, l'amélioration des entraînements et de la technologie nous ont apporté ce résultat impensable à une époque.

UNE SUPÉRIORITÉ AFRICAINE DANS LE SPRINT ?

Il est sans appel que les originaires de l'Afrique de l'Ouest sont doués pour le sprint et ceux de l'Afrique de l'Est pour l'endurance. Exception faite de Patrick Jonhson (métis Australien-Aborigène) et Christophe Lemaître qui tous les deux ont couru sous les 10 secondes au 100 mètres.

Avantage 1

- La longueur des membres inférieurs est un avantage en course à pied alors qu'en natation c'est la longueur du tronc et des longs segments supérieurs qui améliore la flottaison. Le centre de gravité des Noirs est 3 % plus haut que celui des Blancs.

Avantage 2

- L'expérience de la force nécessaire pour étirer les tendons de un centimètre (résistance à l'étirement) qui compare Powell au champion du Japon (Asahara qui court en 10,02 secondes) est surprenante. Un homme moyen a besoin de 43 kg, Asahara de 59 kg et Powell de 114 kg ; la raideur de son tissu conjonctif est sans appel. Des tendons rigides qui restituent très bien l'énergie emmagasinée, la force de rebond est amplifiée (même chose pour Donald Thomas, le champion du monde de saut en hauteur).

Avantage 3

- Le tour des chevilles inférieur. Lacour avait déjà démontré cet avantage des Sénégalais sur les sprinters Italiens. Des chevilles plus petites sont plus légères, pour le travail de fréquence gestuelle, cela facilite l'augmentation de la cadence par moins de poids à déplacer. Les corps des meilleurs athlètes sont dignes de certains culturistes amateurs mais les mollets restent fuyants.

Avantage 4

- L'alpha-actinine 3 (ACTN3). Le fameux gène de la vitesse a été découvert en 2003, nous avons tous deux copies du gène ACTN3, chaque copie étant héritée de chaque parent. Les variations possibles sont :

• XX - TYPE : vous êtes fait pour les épreuves d'endurance.

• RR - TYPE : vous êtes fait pour les épreuves de vitesse/puissance.

• RX - TYPE : vous êtes fait pour les épreuves d'endurance ainsi que pour celles de vitesse/puissance.

Jean-Philippe Leclaire (auteur du livre "Pourquoi les blancs courent moins vite") : "Depuis, beaucoup de recherches ont démontré que la forme RR de ce gène permet à ses détenteurs d'avoir des muscles explosifs lorsque le corps est soumis à certains efforts : une prédisposition naturelle, donc, pour les épreuves de vitesse" ... "avec une forme nulle d'ACTN 3, il est impossible d'égaler les grands sprinters."

Mythe ou réalité ?

Rachel Irving, chercheuse à l'université des West Indies en Jamaïque, démontre que 75 % des 120 athlètes locaux analysés (dont Usain Bolt) seraient dotés de la forme RR. Une étude démontre aussi que les Kenyans sont encore mieux pourvus en RR que les Jamaïcains. Dans son article "Le mythe de l'avantage génétique des sportifs africains", Francesca Sacco explique "qu'en fait, il y a plein de choses qui sont propres aux Africains ou aux Blancs, et qui n'ont rien à voir avec la génétique". "Les composantes sociales, voire familiales, culturelles, environnementales et génétiques forment un ensemble indissociable" … "L'hypothèse d'un 'avantage génétique' des sportifs africains tranche avec sa séduisante commodité."

Les trois premiers avantages sont déjà représentatifs et "génétiques", le quatrième semble encore immature mais laisse des années de recherche motivante à suivre.

2 • Biomécanique de la vitesse

De la marche au sprint

À l'arrêt, le centre de gravité du corps se trouve à la verticale du polygone de sustentation, forme qui est décrite par la forme que nos pieds dessinent. Plus nous avons les pieds écartés, plus il semble facile d'être stable. Pourtant l'enfant devra subir bien des échecs avant d'arriver à cet équilibre. Marcher sera une étape encore plus complexe, d'après Viel (2000). La marche humaine est une activité motrice fondamentale qui nécessite un apprentissage difficile. L'automatisation de cette tâche aboutira à la propulsion, assez atypique dans la nature, les autres espèces étant le plus souvent en mode quadrupède. La marche humaine peut être définie comme la combinaison dans le temps et l'espace de mouvements plus ou moins complexes des différents segments du corps aboutissant au déplacement de l'individu sur un plan horizontal.

Marcher (dans Gillet 2004) :

- maintenir un équilibre dynamique lors des différents types d'appuis (phase unipodale ou bipodale) ;
- coordonner les conditions de la propulsion en s'adaptant à chaque instant aux contraintes de l'environnement extérieur.

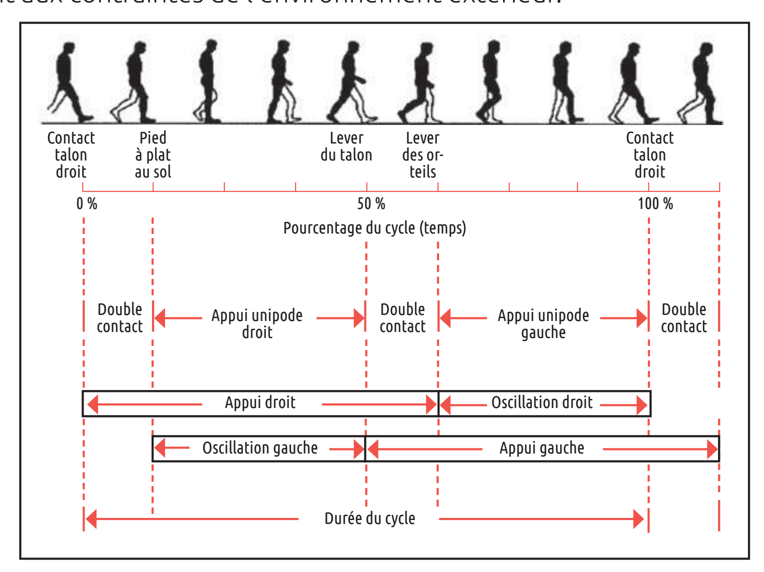


Figure 3 : Cycle de marche (d'après Viel, 2000).

La marche se différencie de la course par la phase du double appuie qui disparaît lors du déplacement "rapide". Les compétitions de marche athlétiques sont jugées de la sorte, dès que les arbitres pensent observer deux pieds en l'air, ils qualifient la marche de course et ils sanctionnent.

La marche possède une **phase d'appui** qui représente 60 % du cycle de la marche. Cette phase est elle-même constituée de trois périodes :
- la réception, contact du talon au sol, dure 15 % du cycle ;
- l'intermédiaire, pied à plat, dure 25 % du cycle (appui unilatéral) ;
- la poussée, qui débute lorsque le centre de gravité passe la verticale de la jambe d'appui, dure 20 % du cycle.

La phase d'oscillation est la phase aérienne d'une des deux jambes, elle dure 40 % du cycle.

Le cycle se répète sur les deux membres ; lorsque la foulée est analysée, nous constatons deux phases de double appui, au début du cycle puis à 45 %, la phase dure 10 % du cycle (20 % cumulés). Les deux pieds étant en contact, c'est le moment où le marcheur est le plus équilibré.

La course est l'absence du double appui, elle est une succession de foulées bondissantes ayant permis à nos ancêtres de chasser très longtemps. Il semblerait que nous soyons un des animaux les plus endurants de la planète malgré ce que nous pourrions penser. Cette aptitude s'est développée sur 2,5 millions d'années, lorsque nous avons pu courir. Cet avantage évolutif de l'homme a abouti à sa domination du monde (l'utilisation qu'il en fait est sûrement discutable). Nous sommes de grands singes bipèdes vulnérables capables de courir des dizaines de kilomètres tous les jours grâce à l'adaptation des générations. Nos épaules sont devenues moins larges, nos bras plus courts, les doigts de pieds ont changé de forme, nos jambes se sont allongées. De longues jambes restent encore un avantage pour la course à pied alors que de longs bras sont intéressants pour la natation.

Ce qui est surprenant, c'est que nous ne sommes pas des sprinters, les quadrupèdes vont beaucoup plus vite ; nous sommes lents, mais très endurants. Il est possible que cette adaptation, ayant permis la chasse (comme la chasse à l'épuisement) et la cueillette, ait laissé du temps au cerveau pour se développer (se défendre avec des outils demande de la réflexion).

La course est une succession de déséquilibres maîtrisés, rattrapés, permettant d'éviter la chute. Une vision simple serait celle de Daniel Lieberman, "courir, c'est simplement sauter d'un pied sur l'autre". Ce déséquilibre dynamique est l'action de forces importantes lorsqu'il s'agit de courir le plus rapidement.

L'analyse des EMG permet de comprendre quelques différences entre la course lente et rapide (Figure 4).

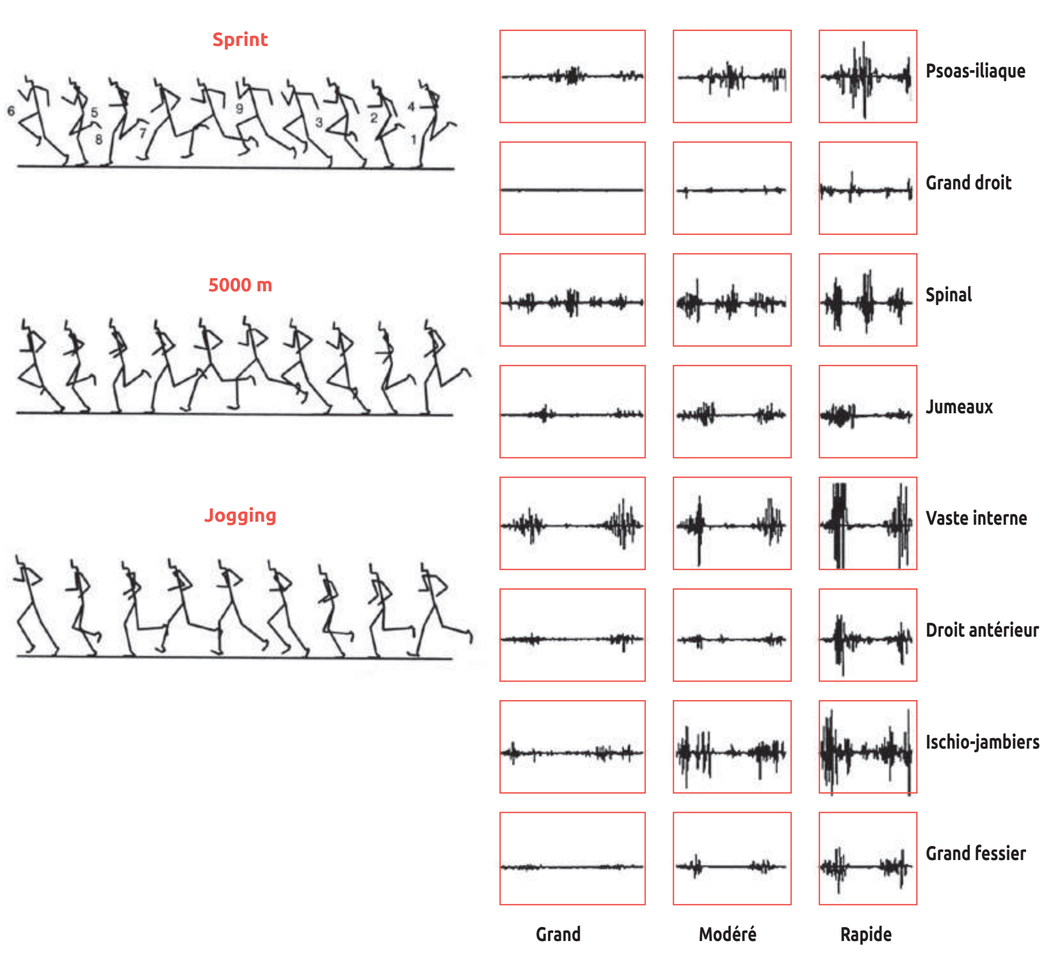


Figure 4 : Différence d'activité musculaire entre la course lente et rapide (d'après Kunz et Unold, 1988).

Des muscles qui semblent en sommeil lors de la course lente deviennent des acteurs essentiels lors du sprint. L'action des ischio-jambiers est au passage très importante pour le blocage du genou.

Les extenseurs de la hanche, de la jambe et le grand fessier sont les groupes musculaires principalement sollicités dans la phase d'accélération initiale. Les ischio-jambiers, les adducteurs et le grand fessier sont ceux qui contribuent le plus à l'atteinte de la vitesse de course maximale.

Le mouvement que subit le pied est également un marqueur du type de course, la poulaine est la forme représentant ce parcours (conséquence des mouvements de la hanche, du genou et de la cheville). Le mot "poulaine" fait référence aux chaussures du Moyen Âge, le terme plus académique est **cyclographe ou cyclogramme**. Un sprinter oscille au niveau de son bassin (si on l'observe de profil) entre 2,5 et 3,5 centimètres alors que le demi-fondeur oscille de 5 à 7 centimètres. Le sprint est une course "stable" par rapport à la course lente, nous recherchons la traction au sol. Pour l'image, il faudrait visualiser une échelle ancrée au sol sur laquelle nous chercherions à gravir les échelons le plus rapidement, c'est le fameux griffé. Le pied va loin devant chercher cette traction, le temps de contact est plus court également et le pied n'a "pas le temps" de trop s'éloigner en arrière mais remonte plus haut.

Cette notion de cycle avant (ou antérieur) et cycle arrière (ou postérieur) nous renseigne sur le niveau du coureur. Lorsqu'un boxeur (par exemple) tente des accélérations sur un stade, aussi bon qu'il puisse être dans sa spécialité, il est débutant en course à pied et la tendance reste de trop remonter le talon sur l'arrière alors qu'il faudrait aller chercher plus "loin devant". La fatigue déforme le geste et même les meilleurs laissent le cycle arrière s'exprimer. Des sprinters aux performances mondiales peuvent avoir un cycle arrière plus prononcé mais la probabilité de blessure est augmentée car les ischio-jambiers sont alors encore davantage sollicités puisqu'il va falloir accélérer très fort pour les emmener sur l'avant.

Figure 5 : Poulaine ou cyclographe du pied pendant une foulée.

Cet aspect nous mène à une analyse des muscles importants de la propulsion en vitesse maximale. Si le grand fessier et les ischio-jambiers restent les plus concernés, les autres n’ont pas qu’un rôle secondaire. Adapté de M. Dufour (2009), voici un tableau récapitulatif de l’analyse des muscles impliqués dans le sprint (page suivante).

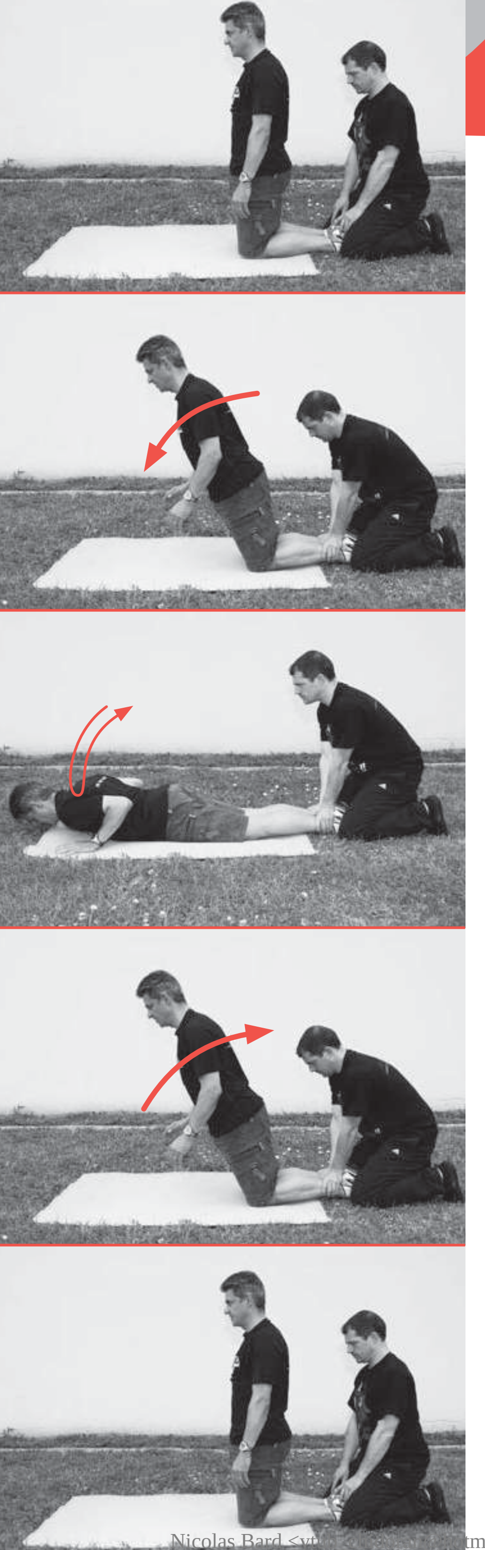
Tableau 5 : Muscles impliqués

Muscles	Principales actions	Travailler en musculation
Grand droit de l'abdomen couplé aux obliques internes et externes	Maintenir le bassin, éviter qu'il ne parte trop en antéversion (vers l'avant). Éviter une hyperlordose lombaire. Un manque de gainage de mouvement limite logiquement la puissance de tout le membre inférieur.	• Gainage de mouvement. • Travail en suspension par les bras et agiter les membres inférieurs. • Des séries en force.
Ilio-psoas	Principaux releveurs de la cuisse ; les sprinters les plus puissants ont ces muscles développés.	Les travailler en amplitude et de manière unilatérale. Un manque de souplesse limite l'extension. • La hip machine et les élastiques sont des exercices à conserver.
Ischio-jambiers	Ils bloquent le genou lorsque celui-ci est vers l'avant et l'entraînent vers l'arrière. Capables de l'extension du genou (et non la flexion) en synergie avec le quadriceps surtout au-dessus de 145°, ils travaillent le plus longtemps durant le sprint. Atteignant 200 % de la force volontaire, il ne faut pas s'étonner des nombreux accidents qu'ils rencontrent.	• Le travail excentrique doit être abordé lorsque le sportif est prêt mais il faudra l'effectuer. • Les courses jambes tendues pour un rebond pliométrique. • Travail en amplitude indispensable.
Grand fessier	Principal extenseur de la cuisse lorsque celle-ci est vers l'avant ; de par son action d'exorotation, à la pose du pied, il stabilisera le bassin en évitant la rotation de ce dernier vers l'intérieur. Action diminuée de ce dernier lorsque le pied passe à la verticale du centre de gravité. En l'air, il a tendance à entraîner la cuisse en abduction, les adducteurs devront contrecarrer cette action.	• Pour solliciter le fessier, travailler en flexion de hanche importante. • Squat heiden, fente, travail à la presse et hip machine sont de bons exercices.
Quadriceps	Ils évitent la chute du corps sur le sol ; plus ils sont puissants, plus l'athlète est stable, ce qui permet aux autres muscles de s'exprimer et raccourcit le temps de contact au sol. Extenseur du genou, ils propulsent durant l'accélération mais s'amenuisent durant la phase de vitesse maximale. Contrairement à la croyance, l'action des quadriceps n'est pas véritablement pliométrique.	• Le leg-extension n'est pas un très bon exercice pour le genou car il "empêche" l'expression des ischio-jambiers et apporte un tiroir sollicitant les ligaments croisés (LCA). • Le demi-squat.

Petit et moyen fessiers	L'appui monopodal demande de stabiliser le bassin (éviter l'affaissement), avec le sprint, la tension est multipliée par 7. Un manque de force de ces "abducteurs" limite l'expression des muscles moteurs.	• Travail de déplacement latéral avec résistance (partenaire). • Travail en amplitude.
Tenseur du fascia-lata	Apporte une stabilité surtout si le grand fessier est "trop" puissant. Limite donc le stress sur les adducteurs sauf si la souplesse fait défaut, à ce moment précis, le rôle des adducteurs est augmenté.	• Travail de musculation léger en amplitude.
Les adducteurs	Ils permettent au membre inférieur de rester en ligne pour compenser la mise en tension importante du grand fessier. À la fois fléchisseur du genou lorsqu'il est derrière et extenseur de ce dernier lorsqu'il est vers l'avant, ils sont très sollicités et se blessent souvent si on manque de préparation.	• Comme pour les abducteurs, le travail en déplacement latéral est un excellent moyen de les travailler. • La machine en position pist-externe (assis) n'est pas très fonctionnelle.
Gastrocnémiens (mollets)	Derniers muscles à travailler avant que le pied ne quitte le sol, ils ont un rôle important dans la performance. Fléchisseurs plantaires, ils ont une sollicitation excentrique permettant la restitution.	• Éviter de travailler la cheville en cherchant une amplitude complète. La flexion dorsale ne doit pas être exagérée afin d'éviter l'hypersollicitation de ce tendon, même si l'inflammation du tendon d'Achille est souvent confondue avec le tendon du long fléchisseur de l'hallux.

Des parties plus pratiques sur la musculation de la vitesse seront dans le chapitre 14 avec des méthodes (séries, répétitions…).

Le travail de vitesse sans musculation semble apporter ses limites sur la stabilité du bassin et donc l'expression des muscles de la propulsion. La musculation permettra de minimiser les déséquilibres musculaires, d'améliorer l'amplitude, la capacité de décontraction musculaire avec la force, d'améliorer la qualité du tissu conjonctif et d'augmenter le rendement.



Nous voulions vous proposer dans cette partie l'exercice ci-dessous, le Glute-ham-gastroc qui sollicite les fessiers, gastrocnémiens, les ischio-jambiers et la sangle lombo-abdominale. Exercice intéressant lorsque l'on arrive à contrôler la première phase. Attention, cet exercice est très sollicitant sur les ischio-jambiers en excentrique, à commencer avec de faibles amplitudes.

Cet exercice est à pratiquer avec une très grande prudence avec des débutants (risque de déchirure musculaire).

Figure 6 : Glut-Ham-Gastroc.

3 • Décomposition de la vitesse pour l'entraînement

Les différentes étapes et facteurs

Nous pouvons distinguer dans la vitesse des étapes qui peuvent faire partie de séances consacrées au développement de ces dernières.

1 • Le départ.

2 • L'accélération.

3 • La vitesse maximale.

4 • Le maintien de la vitesse et la décélération.

Ce que nous voyons de l'extérieur est influencé par quatre facteurs :

1 • le temps de réaction ;

2 • la vitesse gestuelle ;

3 • la fréquence gestuelle ;

4 • l'énergétique.

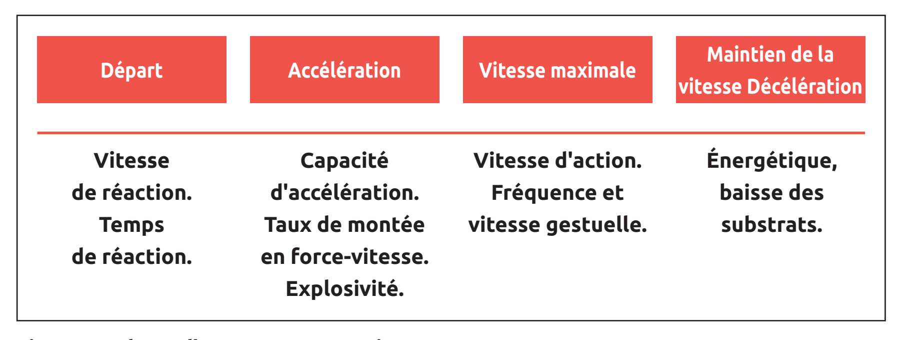


Figure 7 : Phase d'une course en sprint.

Le départ et le temps de réaction

Le temps de réaction (TR) est spécifique au capteur sensoriel utilisé ; le TR est différent si le signal est auditif, visuel, kinesthésique. Le parcours d'un signal se décompose en étapes pas toujours de même durée selon le signal :

- Excitation dans le récepteur de l'oreille.
- Influx nerveux de l'oreille au système nerveux central (oreille ou œil, la longueur des neurones est déjà différente et ces deux organes n'ont pas la même rapidité de prise d'information).
- Traitement de l’information (oreille et œil n'allument pas les mêmes aires du cerveau, le traitement de l'information est donc spécifique).
- Envoi d’un signal moteur.
- Excitation du muscle et manifestation de la contraction.

Dans nos formations de préparateurs physiques, nous avons régulièrement des exercices pour faire varier les informations du sportif : comme par exemple agiter un chiffon rouge ou bleu et lui demander des tâches précises. Rouge il ne bouge pas, bleu il s'exécute, mais en quoi cela le fera t-il progresser ? L'aspect ludique de la séance est appréciable, mais le résultat escompté n'est sûrement pas au rendez-vous.

Si le départ d'un sprint est sonore, alors il faut se conditionner à un signal sonore, surtout que dans le sprint, la tête est vers le bas, un signal visuel demanderait de modifier la posture initiale. Idem pour un sport comme la boxe, si le départ est donné par la voix de l'arbitre ordonnant "fight", nous ne voyons pas l'intérêt de varier les mots ou d'apporter une nouvelle stratégie de départ.

L'expérience des haltérophiles contre les escrimeurs est à conserver en mémoire. Qui atteint la cible le plus rapidement au signal vert avec un fleuret ? Réponse : les haltérophiles. Nous pourrions en conclure qu'ils sont plus réactifs au signal et plus explosifs.

Heureusement, il est constaté que les escrimeurs sont très proches du centre de la cible tandis que les haltérophiles ont touché vite, mais avec une grande imprécision. Qu'en déduire si ce n'est que le traitement du signal a été différent entre nos deux sportifs ? L'analyse et la réponse motrice ont pris un chemin plus "long" mais pourtant optimisé au mieux car il est spécifique.

Peut-on améliorer ce temps ?

Oui, mais très rapidement la limite est atteinte, la règle du faux départ a une origine physiologique.

Si le coureur part en moins de 100 millièmes de seconde après le coup de feu (durée qui correspond au temps minimal que met un signal nerveux pour aller des oreilles aux jambes en passant par le cerveau), le faux départ est annoncé. L'histoire du sprint est remplie d'athlètes ayant le meilleur TR et terminant derniers et l'inverse.

Le TR passé, il est temps d'exprimer la force explosive assez caractéristique du sprint (on nomme cette phase le départ explosif). Lorsque les images sont suffisamment ralenties, il est intéressant d'observer que la première étape d'un sprint est un saut en longueur prenant appui dans les starting-blocks. Véritable squat jump horizontal, la pose des pieds au sol fera par la suite exprimer la puissance-force laissant place à une accélération. Le travail en force et en explosivité est un bon moyen d'améliorer cette étape.

En revanche, varier les départs comme partir sur le dos au sol ou sur le ventre (simulation d’une chute avec départ d’urgence), partir avec un pied surélevé, courir trois pas en arrière et sprinter en avant ou toutes autres actions (les choix sont infinis), semble une proposition intéressante. Le sportif devra revivre des situations proches de son activité.

L’accélération, la vitesse et la fréquence gestuelle, exemple des sports collectifs

De 0 à 70 mètres (comme pour Tyson Gay par exemple) : c'est la distance qu'il faut pour atteindre la vitesse maximale. Déjà, nous pourrions en déduire une application de terrain. Jamais le joueur de sports collectifs ne se reconnaît dans une situation comme celle-ci. Les sprints sont courts, très rarement en ligne droite. Doit-on les entraîner comme des sprinters ou des champions de l'accélération instable ?

La logique est effectivement de ne pas en faire des sprinters sur tartan avec position haute, mais bel et bien des joueurs spécialisés. Pourquoi les entraîneurs d'athlétisme ont-ils été si sollicités à une époque pour l'entraînement de la vitesse en sports collectifs ? Sûrement une mauvaise analyse des besoins.

La notion de vitesse cyclique et acyclique provient de cette évidence. Certaines disciplines n'ont pas le loisir d'optimiser le geste pour l'atteinte d'une vitesse maximale hypothétique pour eux. Courir en évitant un adversaire, en contournant une défense adverse ou en cherchant une nouvelle trajectoire en vue d'une prise de ballon est une spécialisation particulière puisque chaque situation sera différente. Dans une étude bien pensée, il a été observé sept courses de 30 mètres comparant une ligne droite avec six autres trajectoires allant de deux à cinq virages.

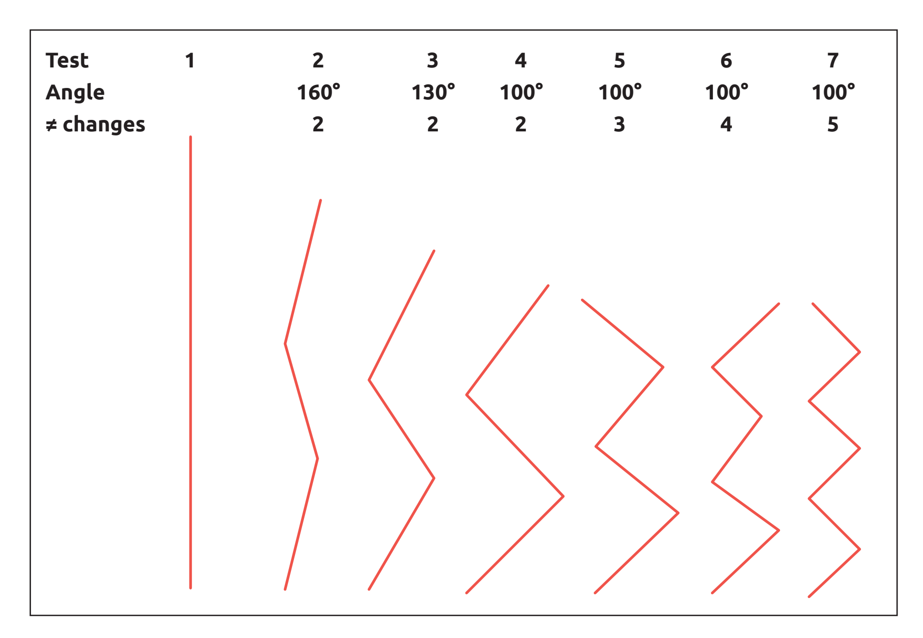


Figure 8 : Description de sept courses de 30 mètres.

Résultat : Les entraînés du sprint linéaire (vitesse cyclique) ne se sont pas améliorés en courses avec virages (slalom, vitesse acyclique). Un exemple de spécificité de l'entraînement, où il ne faut pas confondre vitesse et agilité.

NE PAS SE TROMPER lorsque l'on entraîne une équipe de sport collectif.

Mieux encore, lorsque l'entraînement est proposé comme ci-dessous, vous commencez à rentrer dans le spécifique des sports collectifs. C'est la formule que nous proposons.

Un départ sur ordre précis, une passe en ballon, un sifflement… Accélération sur 10 mètres, le sportif ne connaît pas sa direction, il ira soit à droite soit à gauche au bout des 10 mètres (les plots de côtés sont à 5 mètres). Il faut être attentif à ses pieds : lorsqu'il est sur le pied droit, nous l'envoyons à droite, idem sur le pied gauche, nous l'envoyons à gauche. Assez difficile d'un point de vue motricité. Parfois, une attente de trois secondes est possible entre les deux plots en effectuant un piétinement sur place.

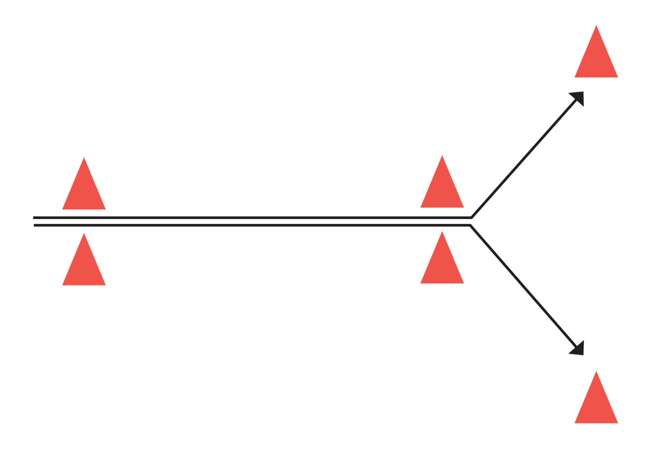


Figure 9 : Le trajet aléatoire, 10 mètres en ligne droite, 5 mètres en latéral.

La vitesse maximale

Si la vitesse maximale s'obtient sur ligne droite à partir de 50 mètres et parfois 70 mètres chez les sprinters, les débutants, eux, l'atteignent vers les 20 à 30 mètres. L'APPLICATION PRATIQUE est que chez le non spécialiste, il ne faut jamais faire dépasser les 20 mètres car la tension est maximale sur la chaîne postérieure et les ischio-jambiers peuvent souffrir jusqu'à la blessure. Des accidents sont possibles et des collègues en ont fait les frais. Faites faire des accélérations, mais pas de vitesse maximale avant que les sportifs ne soient prêts. Si vous reprenez le sport, attendez plusieurs semaines avant de faire des distances supérieures à 20 puis 30 mètres.

Qu'en est-il des sports collectifs ?

Nous sommes presque persuadés que les sportifs n'atteignent jamais leurs vitesses maximales, comme nous l'avons exposé, l'incertitude de la trajectoire, un centre de gravité abaissé intuitivement pour éviter les chutes, une absence de course en ligne droite et tous les autres facteurs semblent appuyer cette hypothèse. L'entraînement n'est donc pas celui de la vitesse, mais celui de l'accélération (Figure 10).

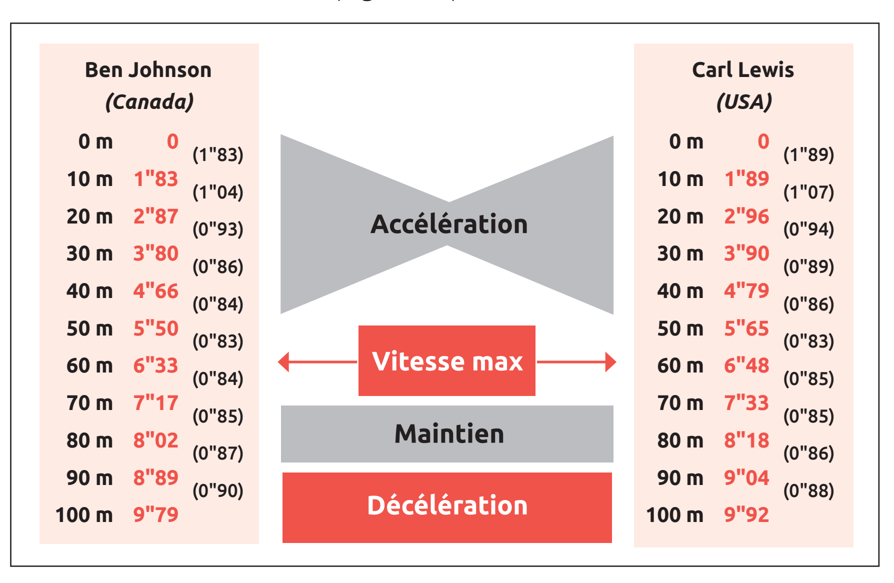


Figure 10 : Les 4 grandes phases d'un 100 mètres.

Le maintien de la vitesse et la décélération ; l'énergétique.

Maintenir sa vitesse est difficile, les statistiques démontrent que les sportifs décélèrent, seuls les présentateurs de télévision pensent que les sprinters accélèrent sur la fin d'un 100 mètres. Carl Lewis n'accélérait pas à la fin, il décélérait moins que les autres. Si tous les pilotes d'une course automobile lâchent l'accélérateur et qu'un seul maintien au moins la pédale à la moitié, l'effet extérieur démontrera l'impression réelle qu'une voiture distance les autres.

Une manière élégante reprise dans de nombreuses formations universitaires : quatre accélérations de 10 à 70 mètres qui forment un bloc, une récupération de 20 secondes (pour les 10 mètres) à 3 minutes (pour les 70 mètres) entre chaque accélération. Une pause de 7 à 10 minutes avant de recommencer un autre bloc, le maximum de blocs est de quatre. Les répétitions et séries ont été observées à partir des concentrations de lactate qui démontrent l'utilisation de la glycolyse (Figure 11).

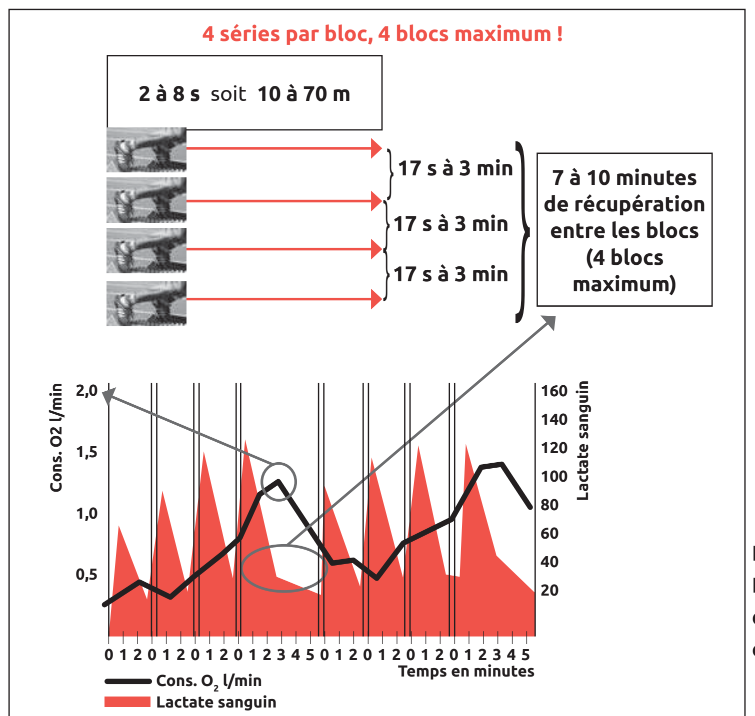


Figure 11 : Exemple de programme en blocs.

Pour vous démontrer notre utilisation de terrain, voici une représentation de la fréquence cardiaque relevée sur un de nos athlètes.

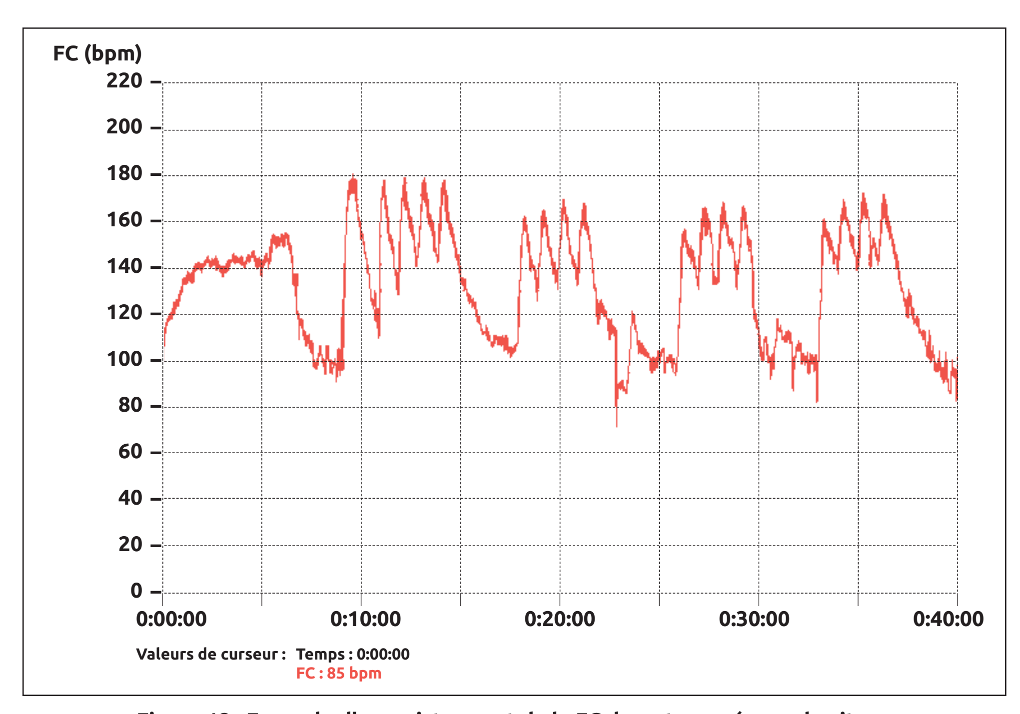


Figure 12 : Exemple d'enregistrement de la FC durant une séance de vitesse.

Informations complémentaires

La course en pente : une petite inclinaison jusqu'à 3 ° semble raisonnable, au dessus, il existe trop de déformation du geste et surtout des forces de freinages trop importante. L'idéal étant d'être en pente durant la vitesse maximale afin de stimuler la survitesse.

La course en montée : à l'instar des traîneaux, parachute ou élastique en résistance, cela augmente la puissance lors de la phase d'accélération.

La survitesse : Elle s'obtient avec le travail de pente mais également avec les élastiques de résistance qui servent également en traction pour la

survitesse. Attention à créer une vitesse très légèrement supérieure mais pas exagérée. Un résultat positif dans le premier cas, une possibilité de blessure dans l'autre.

Le travail de sur-fréquence avec échelle : il existe une pléthore d'exercices fascinants mais pourtant bien peu utile pour les sports collectifs dans le cadre de la vitesse. Hormis apporter du ludique et épater la galerie, cela semble peu intéressant chez le sportif (surtout que certains exercices demandent une motricité à des années lumières de la pratique), sans doute plus motivant chez le jeune afin de développer de la coordination.

Conclusion

La vitesse utilisée en préparation physique est rarement celle du sprinteur, nous vous conseillons de vous focaliser sur l'accélération, les chapitres force et explosivité sont sûrement d'une grande aide même si vous ne recherchiez "que" la vitesse.

Une vision générale à conserver en tête serait celle ci-après.

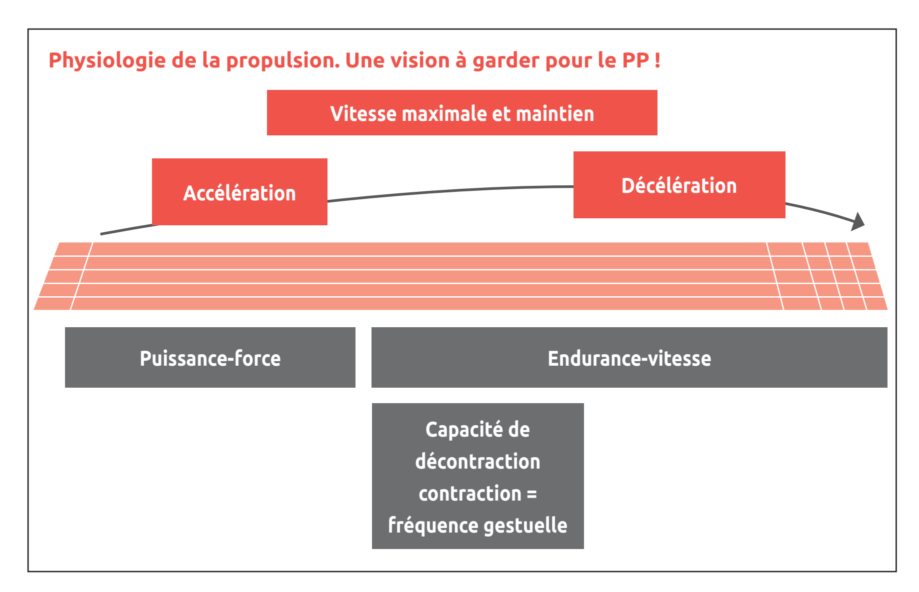


Figure 13 : Physiologie de la propulsion. Une vision globale à garder pour le préparateur physique.

Bibliographie

• 1 • Bosco, C.; Vittori, C. (1986) : Biomechanical characteristics of sprint running during maximal and supra-maximal speed. New Studies in Athletics, 1, 39 - 45.

• 2 • Cavagna, G.A.; Komarek, L.; Mazzoleni, S. (1997) : The mechanics of sprint running. Journal of Physiology, 217, 709-721.

• 3 • Chumanov, E.S.; Heiderscheit, B.C.; Thelen, D.G. (2007) : The effect of speed and influence of individual muscles on hamstring mechanics during the swing phase of sprinting. Journal of Biomechanics, 40, 3555 - 3562.

• 4 • Corn, R. J.; Knudson, D. (2003) : Effect of elastic cord towing on the kinematics of the acceleration phase in sprinting. Journal of Strength and Conditioning Journal, 17, 1, 72 - 75.

• 5 • Dintiman, G.B.; Ward, B.; Ward, R.D. (2003) : Sports Speed. Human Kinetics Publishers.

• 6 • Di Prampero, P.E.; Fusi, S.; Sepulcri, L. ; Morin, J.B. ; Belli, A. ; Antonutto, G. (2005) : Sprint running : a new energetic approach. The Journal of Experimental Biology, 208, 2809 - 2816.

• 7 • Dufour, M. (2009) : L'athlète et le guépard. Editions Volodalen.

• 8 • Duthie, G.M.; Pyne, D.B.; Marsch, D.J.; Hooper, S.L. (2006) : Sprint patterns in Rugby Union players during competition. Journal of Strength and Conditioning Research, 20, 1, 208 - 214.

• 9 • Escamilla et al. (1998). Ischio leg curl, leg press.

• 10 • Francis, C. (1991) : Les pièges de la vitesse. Grafton.

• 11 • Gillet.C. Analyse biomecanique de la marche et proposition de classes de marcheurs - application au portage de sacs a dos. Thèse de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes 2004

• 12 • Heynen, M. (2001) : Hamstring injuries in sprinting. New Studies in Athletics, 16, 3, 43 - 48.

• 13 • Hori, N.; Newton, R.U.; Andrews, W.A.; Kawamori, N.; McGuigan, M.R.; Nosaka, K. (2008) : Does performance of hang power clean differentiate performance of jumping, sprinting, and changing of direction? Journal of Strength and Conditioning Reséarch, 22, 2, 412 - 418.

• 14 • Hoshikawaz, Y.; Muramatsu, M.; Lida, T.; Uchiyama, A. ; Nakajima, Y. ; Kanahisa, H.; Fukunaga, T. (2006) : Influence of the psoas major and thigh muscularity on 100m times in junior sprinters. Med. Sei. Sports Exerc., 38, 12, 2138 - 2143.

• 15 • Johnson, M.D.; Buckley, J'G. (2001) : Muscle power patterns in the mid-acceleration phase of sprinting. J. Sports Sei.; 9, 4, 263 - 272.

• 16 • Kristensen, G.O. ; Van Den Tillaar, R. ; Ettema, G.J.C. (2006) : Velocity specificity in early-phase sprint training. Journal of Strength and Conditioning Research, 20, 4, 833 - 837.

• 17 • Lockie, R.G.; Murphy, A.J.; Spinks, C.D. (2003): Effects of resisted sled towing on sprint kinematics in field sport athletes. Journal of Strength and Conditioning Research, 17, 4, 760 - 767.

• 18 • Mann, R.; Moran, G.; Dougherty, S. (1986) : Comparative electromyography of the lower extremity in jogging, running and sprinting. American Journal of Sports Medicine. 14, 6, 501 - 510.

• 19 • Nan Yang, Daniel G. MacArthur, Jason P. Gulbin, Allan G. Hahn,Alan H. Beggs, Simon Easteal and Kathryn North, ACTN3 Genotype Is Associated with Human Elite Athletic Performance

• 20 • Novachek, T. (1997) : The biomechanics of running and sprinting. In Guten, G. (Ed) Running injuries. WB Saunders and Co : Philadelphia, Am. J. Hum. Genet. 73:627–631, 2003

• 21 • Pinniger, G.J.; Steele, J.B.; Groeller, H. (2000): Does fatigue induced by repeated dynamic efforts affect hamstring muscle function? Med. Sei. Sports Exerc., 32, 3, 647 - 653.

• 22 • Rega, C., Natta, F. (2003) : Quels sont les paramètres dynamiques et cinématiques utiles à l'entraîneur pour analyser l'appui de course du sprinter. Revue de l'Association des Entraîneurs Français d'Athlétisme 166, 7-13.

• 23 • Sheppard, J.M.; Young, W.B.; Doyle, T.L.A.; Sheppard, T.A.; Newton, R.U. (2006) : An evaluation of a new test of reactive agility and its relationship to sprint speed and change of direction speed. Journal of Science and Medicine in Sport, 9, 342 - 349.

• 24 • Spinks, C.D.; Murphy, A.J.; Spinks, W.L.; Lockie, R.G. (2007) : The effects of resisted sprint training on acceleration performance and kinematics in soccer, rugby union, and Australian football players. Journal of Strength and Conditioning Research, 21, 1, 77 - 85.

• 25 • Yoshioka, M.; Tanaka, H.; Shono, N.; Shindo, M.; St-Amand, J. (2007): Gene expression profile of sprinter's muscle. Int. J. Sports Med., 28, 1053 - 1058

• 26 • Young, W.; James, R.; Montgomery, I. (2002) : Is muscle power related to running speed with changes in direction? Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 42, 9, 282 - 288.

• 27 • Young, W.; Farrow, D. (2006) : A review of agility: Practical applications for strength and conditioning. Strength and Conditioning Journal. 28. 5. 24 - 29.

• 27 • Wright et al. (1999). Ischio squat vs leg curl.

9

Comment développer sa masse musculaire ?

Sommaire

Notions d'évaluation **389**

Introduction 389
Les dernières avancées en hypertrophie 398
Force maximale 401

Bibliographie **412**

Notions d'évaluation

Introduction

Un contexte de l'hypertrophie musculaire (masse musculaire) au service de la préparation physique

En aucun cas ce chapitre n'aura la prétention de vous faire parvenir au stade de culturiste professionnel, il existe des ouvrages spécialisés et la supervision d'un coach spécialisé semble inévitable (diététique particulière, apprentissage du posing…). Notre expérience personnelle nous amène également à la limite de la préparation physique, ce domaine n'est pas celui de l'expertise de l'hypertrophie maximale (prise de masse musculaire maximale). En revanche, les sportifs peuvent avoir besoin de prendre de la masse musculaire (le rugbyman ayant besoin de poids "utile", le cycliste en intersaison, le boxeur voulant changer de catégorie de poids) ; à ce moment précis, si le sportif n'est pas parvenu à sa limite naturelle, le préparateur physique sait l'accompagner. Nous reviendrons sur les apports de connaissances permettant de comprendre notre pratique.

L'hypertrophie musculaire

Les muscles peuvent grossir car ils sont plastiques, ils s'adaptent aux contraintes qu'ils subissent. Le terme de "gonflette" trop souvent utilisé est réducteur du travail des sportifs et surtout entièrement incorrect. Les croyances populaires au sein des néophytes et même du monde sportif restent ancrées alors que les culturistes sont très forts (moins que les spécialistes de powerlifting de même poids), ne transforment pas leurs muscles en graisses s'ils arrêtent (ce qui est impossible physiologiquement) et bien d'autres niaiseries…

Définition de l'hypertrophie :
BIOL., BOT. Augmentation anormale du volume d'un organe ou d'un tissu, due à sa dilatation, à l'augmentation du volume des cellules qui le com-

posent (d'après Méd. Biol. t. 2 1971). D'un point de vue pratique, c'est l'augmentation du volume des fibres musculaires existantes. Ce grossissement général peut inclure ce que l'on nomme l'hyperplasie, c'est-à-dire la création de fibres nouvelles. La documentation sur l'hyperplasie est souvent antérieure à 1996. Pourtant, des travaux ultérieurs (80-86) démontrent la formation de nouveaux tubes même après un travail en endurance après 6 semaines d'activités. Sur 10 kg de masse musculaire, il est probable qu'un kilo puisse être dû à l'hyperplasie, soit 10 % (89, p. 72-74).

Masse musculaire versus volume musculaire

Il existe une différenciation entre la prise de masse musculaire et la prise de volume musculaire qui nous étonne continuellement, surtout que cela semble popularisé par Nikituk et Samoilov (1990). Nous avons trouvé des références plus anciennes parlant de théorie voulant expliquer la différence de force entre haltérophile et culturiste (Tesch en 1984 le mentionne, Zatsioksy également ainsi que Yuri Verkhoshansky dans Supertraining). Dans tous les cas, sur les forums de bodybuilding américains ou autres, les références sont inexorablement les mêmes, reprises en boucle, elles dépassent difficilement les années 90 et restent hypothétiques. Le bon sens devrait parfois reprendre le dessus... Un muscle massif sera plus volumineux, un muscle plus volumineux sera plus massif, c'est de la physique. La qualité de la matière cumulée reste encore à définir. Pourtant, on se plaît à distinguer deux types d´hypertrophie (théoriquement) :

- L´hypertrophie chronique ou myofibrillaire due à l´augmentation du diamètre des fibres et donc l'ajout de matière protéique contractile. C'est ce que certains nomment la masse.
- L´hypertrophie transitoire ou sarcoplasmique correspondant à l´augmentation du volume du muscle lors d´un exercice isolé. Elle résulterait essentiellement d´un infiltrat liquidien des espaces interstitiels et intracellulaires du muscle. Ce liquide provenant du secteur plasmatique, le tout cumulé à l'augmentation des réserves énergétiques (stockage du glycogène).

Ne pas la confondre avec la congestion musculaire (que la méthode Blitz tente d'exploiter) d'une durée de quelques heures.

De cette théorie sortent en plus des conseils de "terrain" : l'hypertrophie myofibrillaire c'est pour les charges aux alentours de 6 RM et l'hypertrophie sarcoplasmique pour le 10 RM.
Donc les personnes cherchant à acquérir de la masse feraient ce 6 RM et pour le volume le 10 RM. Comment peut-on distinguer aussi promptement un phénomène pas vraiment dissociable ?
Nous ne voulons pas discréditer les champions ayant ce discours dit de "terrain" en utilisant des termes assez scientifiques (myofibrillaire, sarcoplasmique), mais la pratique intensive donne des sensations, sans permettre en rien de comprendre les mécanismes d'adaptation de l'ultrastructure musculaire.
Pas de distinguo entre l'hypertrophie sarcoplasmique, myofibrillaire, vasculaire, du tissu conjonctif...
Si la cellule augmente son matériel contractile, elle doit augmenter sa quantité de liquide, de réserve énergétique, etc.
Un muscle possède toujours 75 % d'eau, 20 % de protéines et 5 % de sels inorganiques, divers enzymes, minéraux, ions, réserves de lipides et de glycogène...
S'il est vrai que les débutants peuvent multiplier par 5 leurs réserves énergétiques au début d'un entraînement, le confirmé, pratiquant depuis déjà des mois, ne verra pas d'adaptation particulière supplémentaire avec une technique x ou y. Le glycogène n'étant qu'un pourcentage très limité dans le muscle, même en le multipliant par 5, le résultat restera très modeste.
Croyez-vous vraiment qu'un culturiste a besoin de plus de réserves de glycogène (proportionnellement) qu'un marathonien aux mollets atrophiés parcourant 42,195 km ? Avez-vous observé les mollets des Kényans ?

La méta-analyse de 2010 sur l'hypertrophie (87) ne cite que les vieilles références pour mentionner l'hypothétique hypertrophie sarcoplasmique en demandant davantage d'observations.

Lorsque la croyance ne s'observe pas :
Jones.D (2005) : "*L'hypertrophie compensatrice n'a pas d'arguments. Il est possible que les œdèmes causés par les lésions donnent l'impression d'un muscle plus large et mieux défini.*"
Jusqu'à preuve du contraire, pas de distinction possible.

Les adaptations de l'hypertrophie

Dans le muscle, tout grossit. Voici quelques énumérations des adaptations :

- Augmentation du nombre et du diamètre des myofibrilles de chaque fibre musculaire. Les myofibrilles sont les petites fibres qui composent la cellule musculaire (voir annexe).
- Augmentation de la quantité de protéines contractiles, augmentation du nombre de sarcomères (unité contractile du muscle).
- Augmentation du nombre des capillaires sanguins (très petits vaisseaux sanguins). Attention, avec l'augmentation du volume musculaire, même si le nombre de capillaires augmente, la densité baisse, de même pour la myoglobine qui transporte l'oxygène (Billat 1998 ; Tech 1989).
- Augmentation de la quantité et de la résistance des tissus conjonctifs tendineux et ligamenteux.
- Augmentation du nombre de fibres (hyperplasie).
- Augmentation des concentrations de créatine (39 %), de CP (22 %), d´ATP (18 %) et de glycogène (66 %).
- Une hypertrophie de toutes les fibres mais avec une dominance pour les fibres rapides (Alway 1989 ; Hatler 1995 ; McCall 1996).

Les hommes musclés sont-il forts ou est-ce de la gonflette ?

Sur un même individu et il est très important de le préciser, la force est proportionnelle au diamètre de la fibre. Un biceps plus gros est plus fort. La comparaison entre individus n'est pas un argument ; les leviers, le type de fibres musculaires, la qualité du tissu conjonctif, etc. peuvent donner des potentiels de force différents. La gonflette, c'est l'injection de produits de tromperie comme le synthol (huile composée d'acides

gras et de lidocaine qui, une fois injectée, donne un muscle plus gros). Produit dangereux à injecter (si erreur de destination) ; en excès, il pose des problèmes graves et n'a aucun intérêt fonctionnel. Même d'un point de vue esthétique, c'est une aberration par moment.

L'amélioration de la force passe par divers facteurs comme nous l'avions abordé durant le chapitre 6, l'augmentation de la masse musculaire en fait partie. Nous avons regroupé les adaptations de la force avec ou sans augmentation de la masse musculaire. Hormis le poids supplémentaire peu appréciable pour certaines disciplines, le constat est qu'il est assez complet de viser l'hypertrophie.

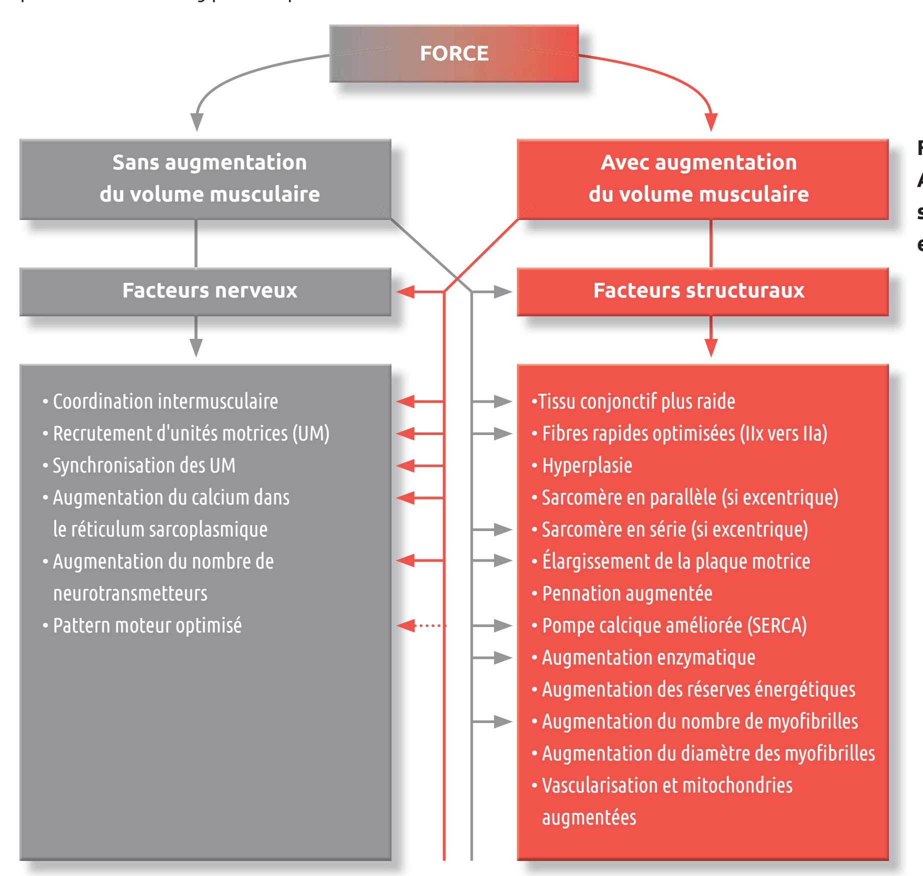


Figure 1 : Adaptations structurales et nerveuses.

L’hypertrophie dans le muscle, des acteurs importants

Les cellules satellites :

- apportent les nouveaux noyaux de la fibre ;
- participent à la reconstruction ;
- seraient à l’origine de l’hyperplasie.

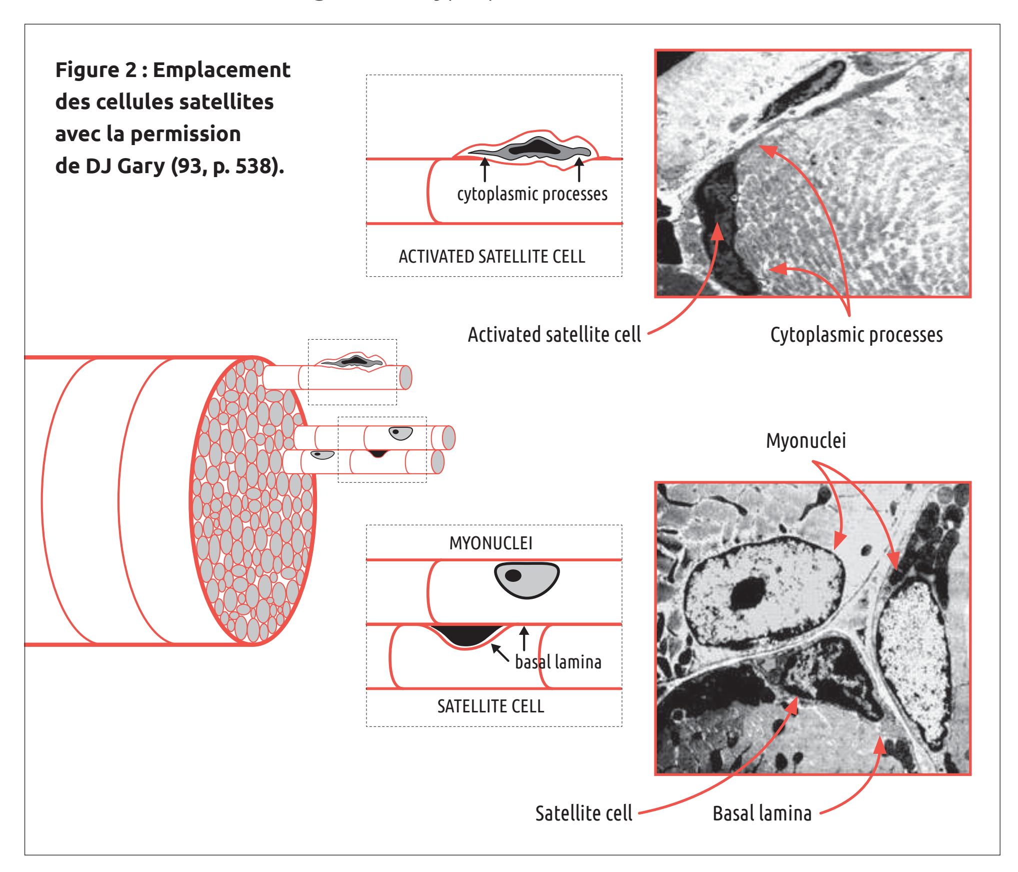


Figure 2 : Emplacement des cellules satellites avec la permission de DJ Gary (93, p. 538).

Les enzymes, facteurs de croissance

Schuelke et coll. (90) ont rapporté le cas clinique d’un enfant né avec une hypertrophie musculaire. À l’âge de 4 ans, l’enfant présente une force in-

habituelle puisqu'il peut porter, bras tendus, 2 poids de 3 kg ! Une échographie réalisée au niveau du quadriceps montre une surface musculaire doublée par rapport à des enfants de même âge. En revanche, l'épaisseur du tissu adipeux sous-cutané est réduite de moitié. Une mutation homozygote affectant un site d'épissage du gène codant pour la myostatine a été mise en évidence chez cet enfant, entraînant l'absence de protéine fonctionnelle dans le sérum.

Sa mère, qui était une athlète professionnelle, est porteuse de la mutation à l'état hétérozygote. Dans sa famille, d'autres personnes sont connues comme exceptionnellement musclées et fortes. Cela suggère que des variants du gène codant pour la myostatine peuvent être associés chez l'homme à des modifications importantes de la masse musculaire.

La recherche de ces variants pourrait être utilisée pour sélectionner de futurs athlètes de haut niveau, ce qui serait, éthiquement parlant, évidemment discutable. En pathologie, l'inhibition de la voie de la myostatine représente une piste intéressante dans le traitement des maladies musculaires dégénératives.

La myostatine est une protéine de la super-famille des TGFβ (transforming growth factor β) exprimée et sécrétée quasi exclusivement par les muscles squelettiques. Elle agit localement comme un inhibiteur de la croissance musculaire en stoppant la différenciation et la croissance des fibres. L'invalidation du gène codant pour la myostatine chez la souris est associée à une augmentation spectaculaire de la masse musculaire.
Il existe une mutation naturelle chez certaines races de bovin (Blanc bleu belge) conduisant à une hypertrophie musculaire massive. À l'inverse, l'injection de myostatine chez la souris est associée à un état cachectique caractérisé par une perte de la masse musculaire.

La follistatine séquestre la myostatine dans la MEC (matrice extracellulaire), antagonise l'effet de l'activine ou de la myostatine et provoque une hypertrophie (monstrueuse) des muscles...

Il existe encore des "mystères" sur les réactions du muscle au stress de l'exercice, beaucoup d'empirisme dans les méthodes, il est difficile de faire l'inventaire de celles-ci puisque chaque champion a la sienne qui fonctionne...

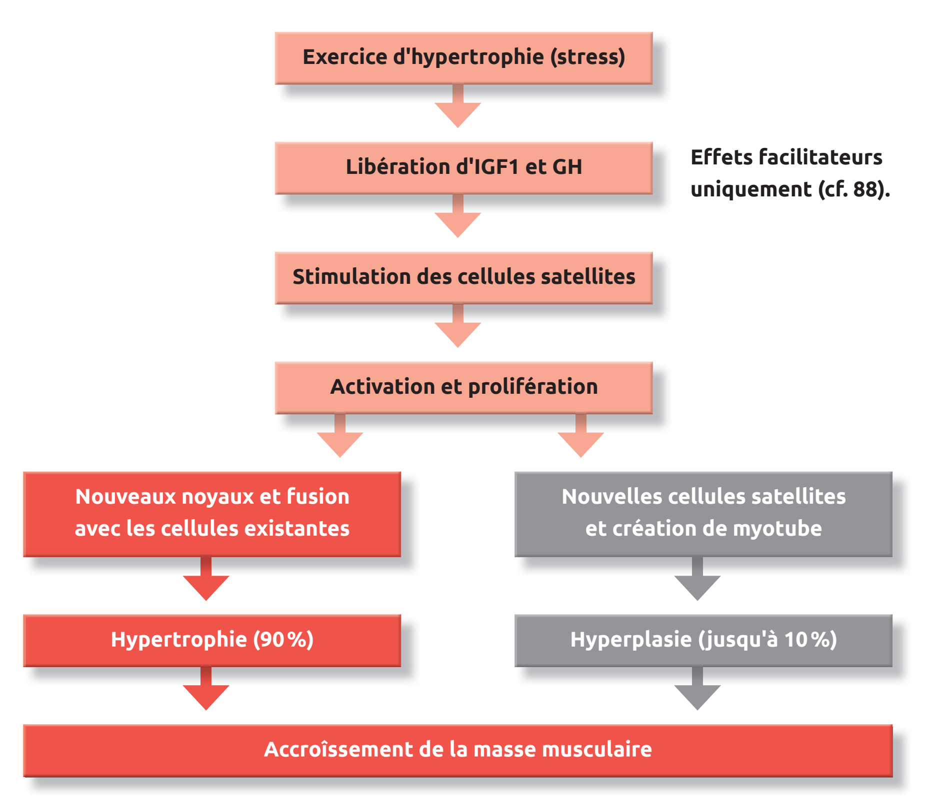


Figure 3 : Processus impliqué dans la prise de masse.

Créer de l'hypertrophie

Plusieurs facteurs sont nécessaires afin de réaliser une augmentation de la masse musculaire, le tableau résume les "ingrédients" gagnants.
L´hypertrophie est le résultat d´une prolifération de la synthèse protéique induite par le stress de l'exercice. Ce stress est bénéfique puisqu'il améliore le potentiel énergétique de l'organisme, la tolérance à l´effort et la

performance musculaire. Les protéines sont anabolisées et catabolisées continuellement, mais la balance dans une des directions est fonction de la demande de l´organisme. L'effort contribue à la baisse de la synthèse protéique tandis que le catabolisme l'augmente. Les besoins d'acides aminés sont nécessaires pour l'anabolisme. La réponse à une charge de travail est très individuelle, c'est la notion d'entraînabilité comme nous l'abordons un peu plus loin.

Figure 4

L'hypertrophie résulte de plusieurs phénomènes cumulés, le respect de tous les paramètres optimise le résultat escompté.

Pic de réponse à 2 - 3 h post-exercice, jusqu'à 36 - 48 h. Cela induit un repos et du sommeil de qualité.

Le type d'action musculaire, stimulation des mécano-récepteurs (les intégrines) grâce aux actions concentriques et excentriques.

Une ischémie, le manque d'oxygène "prolongé" durant l'exercice, induit des adaptations positives. Accumulation de métabolites informationnels.

Prise/présence d'acide aminé. Si les protéines en poudre ne sont pas obligatoires, une diététique adaptée est indispensable, le corps ne peut pas manquer de ses briques constitutionnelles.

Réponse hormonale : Testostérone, growth hormone, cortisol, insuline, insulin-like growth factor I... sont les hormones sécrétées par l'exercice dont le rôle n'est que facilitateur (88). Les réponses hormonales de centaines de personnes sont différentes, les femmes auront moins de testostérone. Certains ont du mal à grossir naturellement, ils ont une insuline "destructrice", une visite chez l'endocrinologue peut aider. Souvent une diminution de la consommation de sucre et l'augmentation de protéines sont favorables.

Les dernières avancées en hypertrophie

La bonne dose : plus lourd n'est pas forcément mieux

Pour finir le débat des apports de connaissance de ce chapitre, nous allons passer ici en revue les dernières avancées concernant l'impact de la charge d'entraînement sur les processus hypertrophiques et la force maximale associée.

Hypertrophie

Le débat fait rage en ce moment autour des paramètres de la charge d'entraînement qui permettraient d'obtenir la stimulation maximale au niveau de la synthèse protéique dans le muscle pour permettre l'hypertrophie.
Ce débat n'intéresse pas seulement les personnes intéressées par les aspects esthétiques du galbe de leurs muscles, qui peut aller jusqu'à des proportions impressionnantes chez les bodybuilders. Il concerne aussi les patients et les seniors chez qui on remarque souvent une diminution de la masse musculaire à l'issue d'une immobilisation, d'un manque d'utilisation ou d'une maladie neuro-dégénérative.

Il existe de très nombreuses façons de stimuler la synthèse de protéines musculaires (SPM). L'exercice musculaire contre résistance, ou renforcement musculaire, est l'une d'entre elles (52), la nutrition aussi. Il a été démontré que les aspects nutritionnels sont importants pour stimuler la synthèse de protéines au niveau musculaire, avec un effet supérieur lorsque l'on associe exercice physique et apport en acides aminés (7, 46, 65).

La variable critique est donc bien la synthèse maximale de protéine nette, c'est-à-dire la différence entre la dégradation et la production de protéines musculaires. Un peu comme ce qu'il vous reste sur votre compte en banque une fois le salaire entré et les charges déduites (frais pour la fiesta du week-end inclus). C'est pourquoi elle a fait l'objet de nombreuses publications dans des conditions expérimentales très diverses.

Pendant l'entraînement, le muscle reçoit de multiples stimulations (nutritionnelles, hormonales, nerveuses). Cependant, d'un point de vue fonctionnel, la seule chose qui permet de soulever un haltère, quelle que soit la configuration adoptée comme charge de travail (volume, intensité, récupération…), c'est la ***décharge électrique finale qui arrive sur le(s) motoneurone(s) du muscle*** sollicité pour le mettre en mouvement. Cette stimulation entraîne à son tour des adaptations tissulaires et moléculaires, le tout exprimé dans un environnement nutritif qui varie selon notre alimentation.

C'est donc l'ensemble de ces facteurs qu'il faut prendre en considération si l'on souhaite y voir plus clair. Mais cela augmente d'autant la complexité de la situation (6, 7, 28, 59-61).

Dans beaucoup de manuels ou de recommandations internationales (3, 4), il est notifié que :

1 • Pour la force maximale, chez les débutants et les personnes de niveau intermédiaire, il est recommandé d'utiliser une charge modérée (70-85 % de 1 RM) pour les 8-12 répétitions par série pour les 1-3 séries par exercice. Et pour l'entraînement avancé, il est recommandé d'utiliser une charge dans la gamme de 70-100 % de 1 RM pendant 1-12 répétitions par série pour les 3-6 séries par exercice d'une périodisation.

2 • Pour l'hypertrophie, l'entraînement doit se faire avec des charges de 60-70% de la 1 RM pour 8-12 répétitions chez les individus de niveau débutant à intermédiaire et des charges de 80-100 % de 1 RM pour les personnes avancées, pour 1-6 répétitions.

Selon ces recommandations, les charges inférieures à 70% de la 1RM pour la force et 60% de la 1RM pour l'hypertrophie ne seraient pas efficaces.

Qu'en est-il en réalité ?

Intensité ou volume ?

En s'intéressant à l'effet de l'intensité de la charge de travail (intensité-volume) sur la synthèse de protéines musculaires, Burd et coll. (8) ont

testé l'hypothèse selon laquelle **ce serait la mobilisation d'un maximum de fibres musculaires en même temps (synchronisation des UM) qui serait le stimulus important pour l'augmentation de la synthèse de protéines musculaires (SMP).** Ils ont proposé aux sujets 3 protocoles :

Tableau 1 : Comparaison des 3 protocoles	90 échec 90 % de la RM à l'échec	30 sans échec 30 % de la RM sans échec	30 échec 30 % de la 1RM à l'échec
Charge (kg)	82 ± 5	28 ± 4	28 ± 3
Répétitions	5 ± 0,2	14 ± 0,5	24 ± 1,1
Volume (kg)	710 ± 30,0	632 ± 28,4	1073 ± 69,9
Temps sous tension (s)	16,3 ± 1,1	27,1 ± 1,85	43,3 ± 1,9

En suivant les paramètres de SPM, ils ont montré que le travail réalisé à 30% de la 1RM à l'épuisement (30 échec) était plus efficace pour augmenter cette synthèse que le travail à charge lourde (90 échec). Même si 4 heures après l'exercice, 90 échec a un effet similaire à 30 échec sur la SPM, cette dernière charge de travail continue à avoir des effets 24 h après l'exercice, ce qui n'est pas le cas de 90 échec. Ceci n'est valable que pour les protéines myofibrillaires. En effet, pour les protéines sarcoplasmiques, 90 échec et 30 échec donnent les mêmes résultats. En reprenant les idées déjà avancées par Henneman et coll. (18, 19, 36), ils en arrivent à la conclusion que **certains mécanismes moléculaires ne sont engagés de façon significatives qu'à partir d'un certain seuil de sollicitation des unités motrices**. Ceci impliquant notamment des molécules de signalisation anabolique (MyoD, myogenin mRNA, cette dernière distinguant notamment les "répondants" des non répondants à un entraînement contre résistance (12)). **La réalisation d'une série de répétitions à l'épuisement, même avec une charge légère, stimule la quasi-totalité des unités motrices des muscles impliqués dans le mouvement.**

Mitchell et coll. (45) ont démontré des effets similaires au niveau hypertrophie entre des charges de 30% et 80% de la 1RM avec 3 séries réalisées à l'épuisement. En comparant le résultat d'une série à 80% à l'épuisement,

ils sont arrivés à la conclusion que c'était le volume qui importait pour stimulait la SPM car la série à 80% donnait des résultats inférieurs à la triple série à 30 % de la 1RM. Concernant l'hypertrophie, il n'y a donc pas d'intensité spécifique mais un volume à gérer pour obtenir les effets désirés sur la SPM. Un large éventail de séances peut donc être utilisé dans le cadre de l'hypertrophie.

Kumar et coll. (27-29) ont mis en évidence une relation dose-effet jusqu'à 60% de la 1RM et un plateau au-delà (jusqu'à 90% de la 1RM) en ce qui concerne la SPM. Ce qui signifie qu'entre 60 et 90%, l'intensité relative de la charge n'est pas le paramètre de la charge d'entraînement qui est le plus important pour maximiser l'hypertrophie. Wilborn et coll. (75) ont démontré la même chose entre 60 et 85% de la 1RM.

Mises ensemble, ces données permettent de conclure que l'utilisation de charges lourdes pour maximiser la SPM n'est donc pas justifiée. L'hypertrophie n'est pas uniquement l'apanage de ces charges comme l'avancent bon nombre de recommandations. Loin s'en faut, d'autres ont aussi montré que les charges aussi légères que 15,5% de la 1RM stimulent déjà la synthèse de protéines en comparaison à 70% de la 1RM, en faisant une durée équivalente de travail, sans aller à l'épuisement (21), phénomène très sensible à l'environnement nutritionnel (22).

Force maximale

La stimulation des unités motrices pour toutes les synchroniser est ce qui permet au final d'obtenir, toutes choses égales par ailleurs, ce que l'on appelle la *force/contraction maximale volontaire ou CMV.*

Si, comme nous l'avons évoqué plus haut, l'influx qui arrive sur le motoneurone est la chose la plus importante, on peut imaginer que plus on soulève lourd, plus on pourra stimuler les unités motrices.
C'est ce qui ressort des recommandations de l'ACSM par exemple qui propose, pour améliorer la force maximale, d'utiliser essentiellement des

charges lourdes d'au moins 70% de la 1RM et pouvant aller jusqu'à la 1RM elle-même. L'idée sous-jacente est une nouvelle fois que seules les charges lourdes permettent de stimuler de façon maximale les mécanismes nerveux à l'origine de la mobilisation du maximum d'unités motrices ou des muscles sollicités.

Ce que montrent les travaux réalisés avec des contractions musculaires enregistrées sous électromyogramme de surface ou en intramusculaire est un peu différent de cette vision une nouvelle fois très sectorielle de l'entraînement contre résistance.

En 1999, Chestnut et Docherty (9) comparent 2 protocoles de répétitions réalisées jusqu'à épuisement avec les muscles fléchisseurs et extenseurs du coude. Les sujets non entraînés font 6 séries de 4RM ou 3 séries de 10RM. Les mesures sont prises aux semaines 0, 6 et 10. Après 10 semaines de travail, ils observent que les résultats sur l'hypertrophie et l'augmentation de la 1RM sont similaires.

Trois ans plus tard, ce sont Behm et coll. (5) qui arrivent à la même conclusion avec des sujets expérimentés chez qui ils ont mobilisé également les fléchisseurs du coude avec 3 protocoles : 5RM, 10RM et 20RM.

Contrairement aux recommandations de l'ACSM, les charges lourdes n'entraînent pas une plus grande sollicitation nerveuse au niveau des muscles mobilisés. Le fait d'aller à la répétition maximale pour chacune des charges (5RM, 10RM, 20RM) est suffisant pour stimuler la quasi-totalité des unités motrices du muscle. Les charges lourdes ne produisent pas plus d'adaptations nerveuses que les charges modérées lorsque l'on travaille jusqu'à épuisement. Une nouvelle fois, le principe de Henneman permet d'expliquer ce phénomène. On met plus de temps à engager les unités motrices II avec la 20RM, mais si l'on va à l'échec avec cette charge, on les mobilisera sur les dernières répétitions. Ce phénomène se produit d'autant plus tôt que la charge est lourde (proche du 1RM).

Congestion ou anti-congestion ?
"Contes de bonnes femmes ou une nouvelle fable ?" [23]

Cette hypothèse est depuis quelque temps supportée par les travaux démontrant une hypertrophie musculaire à l'aide d'exercices de faible intensité réalisés sous restriction de flux sanguin (on parle de "Blood Flow Restriction" ou BFR en anglais) (11, 13, 15, 23, 24, 26, 37-40, 43, 49, 54, 55, 58, 62, 63, 67-70, 78) et dont une revue a été publiée au mois de mars 2013 (53). Caractéristiques des protocoles : faible intensité, 20-30% de la 1RM, 15 à 30 répétitions, des temps de récupération de 30 s maxi.

Une équipe japonaise, rejointe depuis par d'autres laboratoires (1, 2, 10, 11, 24, 25, 33, 34, 41, 42, 47, 48, 50, 64, 66, 77, 78), teste actuellement un protocole basé sur ce principe de restriction de flux sanguin et dont l'objectif est d'essayer d'enrayer l'atrophie musculaire que l'on observe chez les patients atteints de certaines pathologies musculaires mais aussi chez les astronautes qui, en apesanteur, ne sont plus soumis à la gravité et voient leur masse musculaire diminuer à vue d'œil.

Ainsi, si dans l'un des protocoles, il fallait 24 répétitions pour obtenir l'épuisement à 30 % de la 1RM, avec l'occlusion ce nombre diminue grandement pour des effets similaires sur l'hypertrophie.
Cette capacité de stimulation supplémentaire qu'apporterait le travail sous occlusion serait liée à une inhibition de la myostatine (30), facteur de croissance (ancienne appellation : GDF 8) bien connu pour réguler l'hypertrophie musculaire. Son expression surabondante peut entraîner la cachexie et son absence l'hypertrophie. L'entraînement physique permet justement de diminuer son expression (31, 32).

Contrairement à une idée largement répandue dans le milieu de la musculation et du bodybuilding en particulier, la congestion (flux de sang abon-

23 / Petit clin d'œil à un article de 2012 : Burd et coll. "The curious case of anabolic resistance: old wives' tales or new fables?". Comme quoi les scientifiques peuvent aussi avoir de l'humour.

dant au sein du muscle et qui stagne sous l'influence de la contraction musculaire) n'est pas un stimulus permettant la potentialisation des effets de l'hypertrophie musculaire. C'est l'opposé que montre la méthode BFR : c'est le blocage du flux sanguin vers le muscle qui représente le stress activant de façon plus importante les unités motrices de types II.
Qu'en est-il de l'hypertrophie du cerveau avec ce type de méthode ? Nous n'avons trouvé aucune publication qui traite de ce sujet à ce jour... affaire à suivre donc.

Hormones

Côté hormonal, West et coll. (72-74) ont, comme d'autres avant eux, émis quelques doutes sur l'importance supposée des hormones dans les phénomènes d'hypertrophie musculaire. En effet, en utilisant les outils de mesure les plus avancés et en réalisant des protocoles induisant des différences de concentrations hormonales de plus de 300 fois supérieures, ils n'ont pu mettre en évidence un lien de cause à effet entre concentration hormonale et augmentation de la surface de section transverse des muscles de la cuisse, marqueur de la prise de volume. Ces données ont été recueillies sur des groupes allant jusqu'à 56 personnes. Ce qui donne un poids important au niveau des valeurs statistiques obtenues. Ils ont récemment proposé que l'on remettre à plat les idées reliant les hormones aux mécanismes d'hypertrophie, rejoignant en cela les conclusions d'autres concernant cet absence de lien direct avec la SPM (14, 44, 74).

L'augmentation de certaines hormones comme l'insuline au-dessus (x10) de taux normalement présent dans les conditions physiologiques de l'exercice, n'augmente pas la SMP, contrairement aux résultats obtenus chez l'animal. Cette conclusion démontre qu'il faut être très prudent quant à la transposition de l'animal à l'homme car même s'il y a des ressemblances, de nombreuses différences existent entre ces deux modèles physiologiques. Le rôle des hormones serait plus de type permissif puisque l'hypertrophie peut se produire en leur absence. Elles auraient des actions connexes comme celles de l'hormone insuline qui augmente le flux san-

guin des capillaires locaux rendant plus accessibles aux cellules les acides aminés circulants (71).

"Mille viae ducunt homines per saecula romam..."[24]

"Tous les chemins mènent à Rome"... serait une bonne façon de résumer l'ensemble des faits rapportés en cette fin de chapitre sur les dernières avancées dans le domaine de la force et de l'hypertrophie.
Une nouvelle fois, si l'on regroupe l'ensemble de ces résultats, ils démontrent :

1 • qu'il est possible aujourd'hui, à partir de la mesure des changements à court terme des marqueurs de la synthèse de protéines musculaires, de prédire les gains en masse musculaire induits par l'entraînement (17, 20, 51, 72, 73, 76), y compris ceux qui concernent les gains supérieurs observés chez les personnes dites "répondantes" à l'entraînement musculaire, avec les limites d'usage que l'on peut faire (12, 16, 56, 57) ;
2 • que différentes méthodes d'entraînement qui s'opposent selon le principe de spécificité vont certainement devoir être revisitées à la lumière de ces données récentes pour faire des propositions qui permettront de dépasser les incohérences émanant de la comparaison de certains articles et certains ouvrages. Pourquoi ne pas avoir deux poids pour une mesure ? En 2013, Loturco et coll. sont arrivés aux mêmes résultats en termes de force et de puissance après deux programmes organisés différemment au niveau temporel (35).

Des éclaircissements futurs seront dévoilés par des travaux à venir et nous ferons comprendre que l'entraînement possède de nombreuses variantes pour un même objectif. Le principe d'équivalence que nous avons introduit en fin de chapitre sur l'endurance s'applique pour la force et l'hypertrophie aussi.

24 / "Mille viae ducunt homines per saecula Romam Qui Dominum toto quaerere corde voluut." Soit, en français : "Mille routes conduisent depuis des siècles à Rome les hommes qui désirent rechercher le Seigneur de tout leur cœur." D'où est issue la fameuse expression proverbiale latine : "tous les chemins mènent à Rome".

Et il y aurait beaucoup à dire encore sur la maximisation de ces effets avec les aspects nutritionnels. Mais cela nous fait sortir du cadre que nous nous sommes fixés pour cet ouvrage.

Le nombre de séries suffisant pour l'hypertrophie

La réponse est surtout fonction de l'objectif réel... En utilisant les méthodes "classiques", le nombre de séries en musculation semble assez dépendant du niveau de l'individu ainsi que de sa "génétique" (métabolisme, réponse au stress...). Smilios et coll. (91) constate que 4 séries est plus intéressant sans obtenir de gain de force supplémentaire. Pour un stress musculaire plus important, pour une ischémie, un "gonflement" des cellules, plusieurs séries semblent supérieures à une seule. Mais attention, nous sommes habitués à constater que l'échec musculaire n'est pas atteint à chaque série par les pratiquants et que le stress musculaire est donc "obligé" de se cumuler sur plusieurs séries. En effet, l'atteinte de l'échec musculaire systématique est à la fois fatigante pour l'organisme et d'un point de vue méthodologique très contraignante. Il faut soit être assisté, soit parfaitement se connaître.

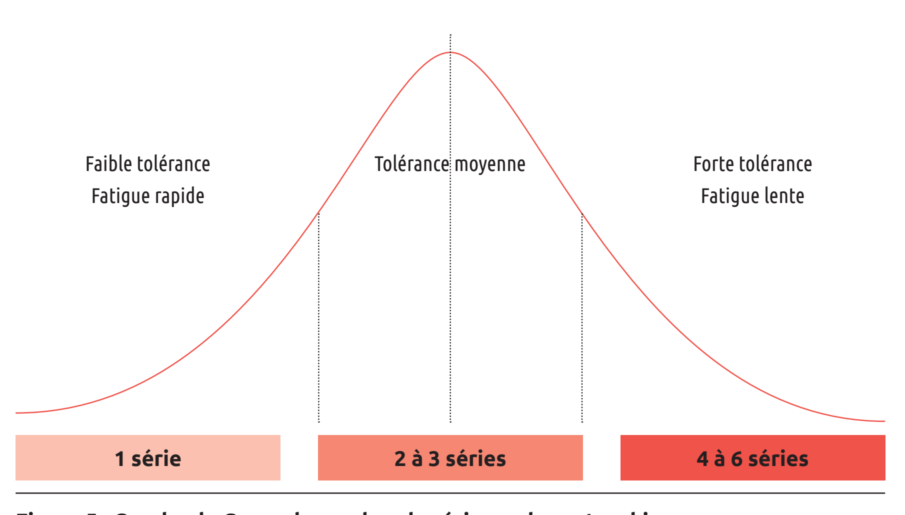


Figure 5 : Courbe de Gauss du nombre de séries en hypertrophie.

Adaptation de l'idée de Dufour dans "Le puzzle de la performance" avec les données de Krieger sur l'hypertrophie

Pour les non spécialistes de l'hypertrophie, un grand nombre de sportifs seront en grande confiance avec un travail de 2 à 3 séries par muscle concerné, 4 serait le compromis de tous les paramètres pour les "sceptiques". Mais attention, en préparation physique, la musculation ne doit pas être une fatigue à la discipline, elle doit être une aide, sinon, vous vous tournez vers la musculation comme discipline prioritaire, d'autres choix sont possibles.

Nous aurions tendance à conseiller les Full-Body (travail de tous les groupes musculaires en une séance) pour de la préparation physique plutôt que des splits routines (dissociation des groupes musculaires sur plusieurs entraînements) alors que nous dirions l'inverse pour des culturistes.

Un argument pour les dames qui ne veulent pas de masse musculaire ?

Sands et McNeal (1997) tentent de savoir si les gymnastes féminines doivent faire de la musculation avec charge. Pour ceci, après un état des lieux de la littérature, ils répertorient et font le constat des pratiques de terrain. En utilisant le tableau 2 (92), ils concluent que les gymnastes doivent en faire mais seulement avec certains types d´exercices qui permettent de développer la force sans gain de masse musculaire.

Tableau 2	Hypertrophie maximale	Hypertrophie minimale
Intensité (% de 1RM)	60 – 80 %	85 – 100 %
Nombre de répétitions	6 – 20	1 – 5
Nombre de séries	3 - 6	4 – 5
Temps de récupération entre séries (min)	2 - 4	4 – 5
Tempo concentrique (secondes par répétition)	1 - 10	1 – 4
Tempo excentrique (secondes par répétition)	4 - 10	3 - 5
Durée des séries (s)	40 - 70	< 20
Exercice par séance	6-12	1-4

Bien que soient établies des "règles", ils remarquent que ces données ne garantissent pas l´évitement de l´hypertrophie. En effet, les réponses aux charges d´entraînement sont très individuelles (notion d'entraînabilité) et dépendent :

- du sexe de la personne,
- de la maturité,
- de la distribution des types de fibres,
- du somatotype,
- de l'état de la formation initiale,
- de la durée de la pratique et sa fréquence (cumulées à un entraînement très musculaire).

Mais que l'on se rassure, hormonalement, les femmes sont en dessous des hommes dans la piste aux gros muscles. De plus, la fréquence de travail, l'évitement régulier de l'échec musculaire et bien d'autres paramètres font qu'elles ne prennent pas aussi vite de la masse musculaire. Pour celles dont c'est l'objectif, la quantité de travail est très importante, et comme les muscles ne grossissent pas de 3 kilogrammes en une seule nuit, si l'orientation de l'entraînement ne s'avère pas le bon visuellement, il est toujours temps d'arrêter.

Les méthodes "classiques"

Nous avions déjà publié ce tableau dans "Le grand livre des exercices de musculation" de Thierry Bredel. Pour les lecteurs ne possédant pas ce guide, voici quelques techniques.

Tableau 3 : Description des méthodes.

Techniques	% du maximum	Nombre de répétitions	Nombre de séries (selon le niveau)	Temps de récupération	Nombre d'exercices par groupe musculaire	Nombre de groupes musculaires par séance	Nombre de séances optimal par semaine
Hypertrophie (masse musculaire), quelques techniques...							
Le 10 x 10 classique	75	10	4 à 10	2 à 3'	4 - 5	2 maxi	4 - 5
Cette méthode est souvent assez mal comprise. Il s'agit de trouver une charge ne permettant de faire que 10 répétitions maximales (RM) sur la première série (après échauffement), la 11e étant impossible ; à la deuxième série, vous ne ferez peut-être que 9 répétitions avec la fatigue. Mais vous n'hésiterez pas à décharger votre barre de quelques kilos pour que chaque série comporte environ 10 répétitions. 10 séries au total sur le groupe musculaire concerné, vous pouvez varier les exercices comme vous voulez (ex : 3 séries de développé couché, 2 séries de décliné, 2 d'incliné, 2 séries de pull-over et une série d'écarté pour finir).							
Bi-sets 1 (isolation + isolation)	80	8 + 8	3 à 6	2 à 3'	2	2 maxi	4
Après avoir fait 8RM d'un exercice d'isolation, vous changez d'exercice pour effectuer 8 RM sur le même groupe musculaire sans temps de récupération d'un autre mouvement d'isolation. Par exemple, vous effectuez 8 butterfly suivis de 8 écartés.							
Bi-sets 2 (isolation + base)	80	8 + 8	3 à 6	2 à 3'	2	2 maxi	4
Après avoir fait 8RM d'un exercice d'isolation, vous changez d'exercice pour effectuer 8 répétitions sur le même groupe musculaire sans temps de récupération d'un autre mouvement de base. Par exemple, vous effectuez 8 butterflys suivis de 8 développés couchés.							
Bi-sets 3 (base + isolation)	80	8 + 8	3 à 6	2 à 3'	2	2 maxi	4
Après avoir fait 8RM d'un exercice de base, vous changez d'exercice pour effectuer 8 répétitions sur le même groupe musculaire sans temps de récupération d'un mouvement d'isolation. Par exemple, vous effectuez 8 développés couchés suivis de 8 butterflys.							
Bi-sets 4 (pré-fatigue)	85 + 75	6 + 10	3 à 6	2 à 3'	2	2 maxi	4
Après avoir fait 4RM d'un exercice d'isolation, vous changez d'exercice pour effectuer 10 répétitions sur le même groupe musculaire sans temps de récupération d'un mouvement de base. Par exemple, vous effectuez 6 butterflys suivis de 10 RM développé couché.							
Bi-sets 5 (post-fatigue)	75 + 85	10 + 6	3 à 6	2 à 3'	2	2 maxi	4
Après avoir fait 10RM d'un exercice de base, vous changez d'exercice pour effectuer 6 RM sur le même groupe musculaire sans temps de récupération d'un mouvement d'isolation. Par exemple, vous effectuez 10RM en développé couché suivis de 6 RM butterflys.							
Bi-sets 6 (pré et post-fatigue)	85+75+85	6+10 + 6	3 à 4	2 à 3'	2	2 maxi	4
Bien qu'il y ait trois exercices, la méthode est née des variantes bi-sets. 6 RM d'isolation, 10 RM d'exercices de base puis de nouveau 6 RM. Le muscle ciblé "souffre" et pour ceux qui aiment l'état de fatigue, ils sont servis.							
Bi-sets 7 (agoniste antagoniste)	75	10 + 10	3 à 6	2 à 3'	2	2 maxi	4
Version intéressante du Bi-set, travailler un muscle et son muscle dit antagoniste au mouvement. Faire 10 répétitions en développé couché suivies sans temps de récupération de 10 répétitions en rowing horizontal.							

Tableau 3 (suite)

Techniques	% du maximum	Nombre de répétitions	Nombre de séries (selon le niveau)	Temps de récupération	Nombre d'exercices par groupe musculaire	Nombre de groupes musculaires par séance	Nombre de séances optimal par semaine
Hypertrophie (masse musculaire), quelques techniques...							
Répétitions forcées	75	10 + 2	4 à 10	2 à 3'	3 - 4	2 maxi	4
Cette méthode est identique au 10X10 classique mais se pratique avec partenaire, l'objectif étant qu'arrivé à l'échec musculaire, votre partenaire vous aide à lever la barre pour vous permettre 2 répétitions de plus. Mentalement et sur le plan fatigue, cette méthode est appréciable.							
Bulk systeme	85	6 + 6 + 6	3 à 6	2 à 3'	3	2	4
Méthode qui consiste à enchaîner trois exercices différents à la suite. Par exemple, vous enchaînez 6 RM en butterfly, sans temps de récupération, 6RM en développé couché puis 6RM en écarté. Comme cela fait au final 18 répétitions sur le groupe musculaire concerné en une seule série, 4 séries de cet ensemble est le maximum conseillé.							
Rest pause training	75	10+1+1+1	4 à 10	3'	3-4	2 maximums	4
Suite à l'échec musculaire, c'est-à-dire sur cette technique après 10 RM, prenez une récupération de 10 secondes (il a donc fallu reposer la barre), puis refaites une répétition, répétez l'opération 3 fois puis récupérez 3 minutes.							
Séries dégressives (drop sets)	95 puis 90...	10	4 à 10	2 à 3'	3-4	2 maxi	4
Partez d'une charge lourde ne permettant qu'un ou deux mouvements, déchargez, puis refaites un ou deux mouvements, à la fin, vous devez avoir fait 10 mouvements. Pour des mouvements complexes, vous reposez la barre et le partenaire décharge. Pour des petits groupes musculaires, il est facile de prévoir plusieurs haltères comme pour les biceps.							
Tri-sets	75	10 RM x 3	3 à 6	3'	3	2	4
Méthode qui consiste à enchaîner trois exercices différents à la suite. Par exemple, vous enchaînez 10 RM en butterfly, sans temps de récupération, 10 RM en développé couché puis 10 RM en écarté. Comme cela fait au final 30 répétitions sur le groupe musculaire concerné en une seule série, 4 séries de cet ensemble est le maximum conseillé. Les méthodes se ressemblent, mais ce n'est ni du Bulk system ni de la pré et post activation réunis.							
Séries géantes (le chemin de la mort)	75	10+10+10+10	3 à 6	2 à 3'	3-4	2 maxi	4
Dépassez 3 exercices sur un même muscle (4 ou 5), vous entamez les giants sets, méthode difficile qui épuise les réserves musculaires.							
Méthode en Full-Body	75	10	4 à 10	3'	1	Tous	2
Dans une même séance, par manque de temps ou pour récupérer provisoirement, vous allez faire tous les groupes musculaires par des mouvements globaux avec 3 séries par exercice. Exemple : 2 séries de squat, 2 développé couché, 2 rowing menton, 1 tirage poitrine, 1 tirage horizontal, chaise romaine et abdominaux. Séance intense, sécrétrice d'hormones et sollicitante, entretient amplement des résultats déjà visibles.							

Tableau 3 (fin)

La tension continue	70	10	4 à 10	2 à 3'	3-4	2 maxi	4
Méthode qui consiste à ne pas faire d'amplitude afin de provoquer un état de fatigue supplémentaire. Par exemple, si vous ne venez pas toucher la poitrine et que vous ne verrouillez pas les coudes en développé couché, il n'y a aucun petit moment de répit.							
Les répétitions partielles hautes	85	10	4 à 10	2 à 3'	3-4	2 maxi	4
Partir de la position de départ puis descendre jusqu'à la moitié de l'amplitude puis remonter et ainsi de suite. Cela permet de travailler plus lourd. Exemple : partir en développé couché et descendre à mi-amplitude.							
Les répétitions partielles basses	75	10	4 à 10	2 à 3'	3-4	2 maxi	4
Partir de la position la plus complète dans l'amplitude du mouvement puis remonter et ainsi de suite. Cela permet de travailler les angles faibles que les pratiquants évitent. Exemple : partir en développé couché au niveau de la poitrine puis remonter mi-amplitude et redescendre.							

Il existe tellement de techniques différentes qu'il est facile d'en trouver de nouvelles sur Internet. Les champions et les différents auteurs contribuent à l'enrichissement de la pratique, nous-même avons une affinité pour cette méthode que nous nommons l'Iso-trophie (contraction de l'isométrie induisant de l'hypertrophie). Une "asphyxie" du muscle en statique (isométrie) de 20 secondes avec une amplitude mi-course (objectif, créer de l'anti-congestion sur le moment), une repose de barre de moins de 10 secondes (8 maximum) afin de ne pas laisser la myoglobine se recharger complètement (que le muscle soit encore privé partiellement d'oxygène), et enchaîner 8 répétitions. L'idéal serait d'être à l'échec sur la dernière. Adapter les charges pour être à l'échec ou ajouter une tension par le pareur.
Pas plus de 4 semaines, et renouveler tous les 3 mois si possible.

Tableau 4

Techniques	% du maximum	Nombre de répétitions	Nombre de séries (selon le niveau)	Temps de récupération	Nombre d'exercices par groupe musculaire	Nombre de groupes musculaires par séance	Nombre de séances optimal par semaine
Hypertrophie (masse musculaire), quelques techniques…							
Iso-trophie	70	1 de 20" + 8RM	2 à 4	2 à 3'	2 maxi	2 maxi	2 à 3

Bibliographie

• 1 • Abe T, Kearns CF, and Sato Y. Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training. J Appl Physiol 100: 1460-1466, 2006.

• 2 • Abe T, Sakamaki M, Fujita S, Ozaki H, Sugaya M, Sato Y, and Nakajima T. Effects of low-intensity walk training with restricted leg blood flow on muscle strength and aerobic capacity in older adults. J Geriatr Phys Ther 33: 34-40, 2010.

• 3 • ACSM, Kraemer WJ, Adams K, Cafarelli E, Dudley GA, Dooly C, Feigenbaum MS, Fleck SJ, Franklin B, Fry AC, Hoffman JR, Newton RU, Potteiger J, Stone MH, Ratamess NA, and Triplett-McBride T. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. Med Sci Sports Exerc 34: 364-380, 2002.

• 4 • ACSM, Ratamess NA, Alvar BA, Evetoch TK, Housh TJ, Ben Kibler W, Kraemer WJ, and N. TT. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. Med Sci Sports Exerc 41: 687-708, 2009.

• 5 • Behm DG, Reardon G, Fitzgerald J, and Drinkwater E. The Effect of 5, 10, and 20 Repetition Maximums on the Recovery of Voluntary and Evoked Contractile Properties. The Journal of Strength & Conditioning Research 16: 209-218, 2002.

• 6 • Biolo G. Protein metabolism and requirements. World Rev Nutr Diet 105: 12-20, 2013.

• 7 • Biolo G, Tipton KD, Klein S, and Wolfe RR. An abundant supply of amino acids enhances the metabolic effect of exercise on muscle protein. Am J Physiol 273: E122-129, 1997.

• 8 • Burd NA, West DW, Staples AW, Atherton PJ, Baker JM, Moore DR, Holwerda AM, Parise G, Rennie MJ, Baker SK, and Phillips SM. Low-load high volume resistance exercise stimulates muscle protein synthesis more than high-load low volume resistance exercise in young men. PloS one 5: 0012033, 2010.

• 9 • Chestnut JL and Docherty D. The Effects of 4 and 10 Repetition Maximum Weight-Training Protocols on Neuromuscular Adaptations in Untrained Men. The Journal of Strength & Conditioning Research 13: 353-359, 1999.

• 10 • Cook SB, Clark BC, and Ploutz-Snyder LL. Effects of exercise load and blood-flow restriction on skeletal muscle function. Med Sci Sports Exerc 39: 1708-1713, 2007.

• 11 • Credeur DP, Hollis BC, and Welsch MA. Effects of handgrip training with venous restriction on brachial artery vasodilation. Med Sci Sports Exerc 42: 1296-1302, 2010.

• 12 • Davidsen PK, Gallagher IJ, Hartman JW, Tarnopolsky MA, Dela F, Helge JW, Timmons JA, and Phillips SM. High responders to resistance exercise training demonstrate differential regulation of skeletal muscle microRNA expression. J Appl Physiol 110: 309-317, 2011.

• 13 • Fujita S, Abe T, Drummond MJ, Cadenas JG, Dreyer HC, Sato Y, Volpi E, and Rasmussen BB. Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis. J Appl Physiol 103: 903-910, 2007.

• 14 • Greenhaff PL, Karagounis LG, Peirce N, Simpson EJ, Hazell M, Layfield R, Wackerhage H, Smith K, Atherton P, Selby A, and Rennie MJ. Disassociation between the effects of amino acids and insulin on signaling, ubiquitin ligases, and protein turnover in human muscle. Am J Physiol Endocrinol Metab 295: E595-604, 2008.

• 15 • Gundermann DM, Fry CS, Dickinson JM, Walker DK, Timmerman KL, Drummond MJ, Volpi E, and Rasmussen BB. Reactive hyperemia is not responsible for stimulating muscle protein synthesis following blood flow restriction exercise. J Appl Physiol 112: 1520-1528, 2012.

• 16 • Hanson ED, Jenkins NT, and Roth SM. Genetic information will influence but not predict the first two-hour marathon. J Appl Physiol 110: 290; discussion 294, 2011.

• 17 • Hartman JW, Tang JE, Wilkinson SB, Tarnopolsky MA, Lawrence RL, Fullerton AV, and Phillips SM. Consumption of fat-free fluid milk after resistance exercise promotes greater lean mass accretion than does consumption of soy or carbohydrate in young, novice, male weightlifters. Am J Clin Nutr 86: 373-381, 2007.

• 18 • Henneman E. Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge. Science 126: 1345-1347, 1957.

• 19 • Henneman E. The size-principle: a deterministic output emerges from a set of probabilistic connections. J Exp Biol 115: 105-112, 1985.

• 20 • Holm L, O'Rourke B, Ebenstein D, Toth MJ, Bechshoeft R, Holstein-Rathlou NH, Kjaer M, and Matthews DE. Determination of steady state protein breakdown rate in vivo by the disappearance of protein-bound tracer-labeled amino acids: a method applicable in humans. Am J Physiol Endocrinol Metab, 2013.

• 21 • Holm L, Reitelseder S, Pedersen TG, Doessing S, Petersen SG, Flyvbjerg A, Andersen JL, Aagaard P, and Kjaer M. Changes in muscle size and MHC composition in response to resistance exercise with heavy and light loading intensity. J Appl Physiol 105: 1454-1461, 2008.

• 22 • Holm L, van Hall G, Rose AJ, Miller BF, Doessing S, Richter EA, and Kjaer M. Contraction intensity and feeding affect collagen and myofibrillar protein synthesis rates differently in human skeletal muscle. Am J Physiol Endocrinol Metab 298: E257-269, 2010.

• 23 • Horiuchi M and Okita K. Blood flow restricted exercise and vascular function. International journal of vascular medicine 2012: 543218, 2012.

• 24 • Iida H, Kurano M, Takano H, Kubota N, Morita T, Meguro K, Sato Y, Abe T, Yamazaki Y, Uno K, Takenaka K, Hirose K, and Nakajima T. Hemodynamic and neurohumoral responses to the restriction of femoral blood flow by KAATSU in healthy subjects. Eur J Appl Physiol 100: 275-285, 2007.

• 25 • Iida H, Nakajima T, Kurano M, Yasuda T, Sakamaki M, Sato Y, Yamasoba T, and Abe T. Effects of walking with blood flow restriction on limb venous compliance in elderly subjects. Clinical physiology and functional imaging 31: 472-476, 2011.

• 26 • Kawada S and Ishii N. Skeletal muscle hypertrophy after chronic restriction of venous blood flow in rats. Med Sci Sports Exerc 37: 1144-1150, 2005.

• 27 • Kumar V, Atherton P, Smith K, and Rennie MJ. Human muscle protein synthesis and breakdown during and after exercise. J Appl Physiol 106: 2026-2039, 2009.

• 28 • Kumar V, Atherton PJ, Selby A, Rankin D, Williams J, Smith K, Hiscock N, and Rennie MJ. Muscle protein synthetic responses to exercise: effects of age, volume, and intensity. The journals of gerontology Series A, Biological sciences and medical sciences 67: 1170-1177, 2012.

• 29 • Kumar V, Selby A, Rankin D, Patel R, Atherton P, Hildebrandt W, Williams J, Smith K, Seynnes O, Hiscock N, and Rennie MJ. Age-related differences in the dose-response relationship of muscle protein synthesis to resistance exercise in young and old men. J Physiol 587: 211-217, 2009.

• 30 • Laurentino GC, Ugrinowitsch C, Roschel H, Aoki MS, Soares AG, Neves M, Jr., Aihara AY, Fernandes Ada R, and Tricoli V. Strength training with blood flow restriction diminishes myostatin gene expression. Med Sci Sports Exerc 44: 406-412, 2012.

• 31 • Lenk K, Erbs S, Hollriegel R, Beck E, Linke A, Gielen S, Winkler SM, Sandri M, Hambrecht R, Schuler G, and Adams V. Exercise training leads to a reduction of elevated myostatin levels in patients with chronic heart failure. European journal of preventive cardiology 19: 404-411, 2012.

• 32 • Lenk K, Schur R, Linke A, Erbs S, Matsumoto Y, Adams V, and Schuler G. Impact of exercise training on myostatin expression in the myocardium and skeletal muscle in a chronic heart failure model. European journal of heart failure 11: 342-348, 2009.

• 33 • Loenneke JP, Kearney ML, Thrower AD, Collins S, and Pujol TJ. The Acute Response of Practical Occlusion in the Knee Extensors. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 2831-2834 2810.1519/JSC.2830b2013e3181f2830ac2833a, 2010.

• 34 • Loenneke JP and Pujol TJ. KAATSU: Rationale for application in Astronauts. Hippokratia 14: 224, 2010.

• 35 • Loturco I, Ugrinowitsch C, Roschel H, Lopes Mellinger A, Gomes F, Tricoli V, and Gonzáles-Badillo JJ. Distinct Temporal Organizations of the Strength- and Power-Training Loads Produce Similar Performance Improvements. The Journal of Strength & Conditioning Research 27: 188-194 110.1519/JSC.1510b1013e3182503807, 2013.

• 36 • Luscher HR, Ruenzel P, and Henneman E. How the size of motoneurones determines their susceptibility to discharge. Nature 282: 859-861, 1979.

• 37 • Madarame H, Kurano M, Fukumura K, Fukuda T, and Nakajima T. Haemostatic and inflammatory responses to blood flow-restricted exercise in patients with ischaemic heart disease: a pilot study. Clinical physiology and functional imaging 33: 11-17, 2013.

• 38 • Madarame H, Kurano M, Takano H, Iida H, Sato Y, Ohshima H, Abe T, Ishii N, Morita T, and Nakajima T. Effects of low-intensity resistance exercise with blood flow restriction on coagulation system in healthy subjects. Clinical physiology and functional imaging 30: 210-213, 2010.

• 39 • Madarame H, Ochi E, Tomioka Y, Nakazato K, and Ishii N. Blood flow-restricted training does not improve jump performance in untrained young men. Acta physiologica Hungarica 98: 465-471, 2011.

• 40 • Madarame H, Sasaki K, and Ishii N. Endocrine responses to upper- and lower-limb resistance exercises with blood flow restriction. Acta physiologica Hungarica 97: 192-200, 2010.

• 41 • Manini TM and Clark BC. Blood Flow Restricted Exercise and Skeletal Muscle Health. Exercise and sport sciences reviews 37: 78-85 10.1097/JES.1090b1013e31819c31812e31815c, 2009.

• 42 • Manini TM and Clark BC. Physical Activity and Children's Bone Health: A Little Goes a Long Way Blood Flow Restricted Exercise and Skeletal Muscle Health. Exercise and sport sciences reviews 40: 2-3 10.1097/JES.1090b1013e31823cd31877a, 2012.

• 43 • Manini TM, Vincent KR, Leeuwenburgh CL, Lees HA, Kavazis AN, Borst SE, and Clark BC. Myogenic and proteolytic mRNA expression following blood flow restricted exercise. Acta Physiol (Oxf) 201: 255-263, 2011.

• 44 • Marimuthu K, Murton AJ, and Greenhaff PL. Mechanisms regulating muscle mass during disuse atrophy and rehabilitation in humans. J Appl Physiol 110: 555-560, 2011.

• 45 • Mitchell CJ, Churchward-Venne TA, West DW, Burd NA, Breen L, Baker SK, and Phillips SM. Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. J Appl Physiol 113: 71-77, 2012.

• 46 • Moore DR, Tang JE, Burd NA, Rerecich T, Tarnopolsky MA, and Phillips SM. Differential stimulation of myofibrillar and sarcoplasmic protein synthesis with protein ingestion at rest and after resistance exercise. J Physiol 587: 897-904, 2009.

• 47 • Nakajima T, Iida H, Kurano M, Takano H, Morita T, Meguro K, Sato Y, Yamazaki Y, Kawashima S, Ohshima H, Tachibana S, Ishii N, and Abe T. Hemodynamic responses to simulated weightlessness of 24-h head-down bed rest and KAATSU blood flow restriction. Eur J Appl Physiol 104: 727-737, 2008.

• 48 • Nakajima T, Kurano M, Hasegawa T, Takano H, Iida H, Yasuda T, Fukuda T, Madarame H, Uno K, Meguro K, Shiga T, Sagara M, Nagata T, Maemura K, Hirata Y, Yamasoba T, and Nagai R. Pentraxin3 and high-sensitive C-reactive protein are independent inflammatory markers released during high-intensity exercise. Eur J Appl Physiol 110: 905-913, 2010.

• 49 • Nielsen JL, Aagaard P, Bech RD, Nygaard T, Hvid LG, Wernbom M, Suetta C, and Frandsen U. Proliferation of myogenic stem cells in human skeletal muscle in response to low-load resistance training with blood flow restriction. J Physiol 590: 4351-4361, 2012.

• 50 • Nishimura A, Sugita M, Kato K, Fukuda A, Sudo A, and Uchida A. Hypoxia increases muscle hypertrophy induced by resistance training. Int J Sports Physiol Perform 5: 497-508, 2010.

• 51 • Phillips SM, Hartman JW, and Wilkinson SB. Dietary protein to support anabolism with resistance exercise in young men. Journal of the American College of Nutrition 24: 134S-139S, 2005.

• 52 • Phillips SM, Tipton KD, Aarsland A, Wolf SE, and Wolfe RR. Mixed muscle protein synthesis and breakdown after resistance exercise in humans. Am J Physiol 273: E99-107, 1997.

• 53 • Pope ZK, Willardson JM, and Schoenfeld BJ. A Brief Review: Exercise and Blood Flow Restriction. The Journal of Strength & Conditioning Research Publish Ahead of Print: 10.1519/JSC.1510b1013e3182874721, 2013.

• 54 • Reisin E and Jack AV. Obesity and hypertension: mechanisms, cardio-renal consequences, and therapeutic approaches. The Medical clinics of North America 93: 733-751, 2009.

• 55 • Renzi CP, Tanaka H, and Sugawara J. Effects of leg blood flow restriction during walking on cardiovascular function. Med Sci Sports Exerc 42: 726-732, 2010.

• 56 • Roth SM. MicroRNAs: playing a big role in explaining skeletal muscle adaptation? J Appl Physiol 110: 301-302, 2011.

• 57 • Roth SM. Critical overview of applications of genetic testing in sport talent identification. Recent patents on DNA & gene sequences 6: 247-255, 2012.

• 58 • Sakamaki M, Yasuda T, and Abe T. Comparison of low-intensity blood flow-restricted training-induced muscular hypertrophy in eumenorrheic women in the follicular phase and luteal phase and age-matched men. Clinical physiology and functional imaging 32: 185-191, 2012.

• 59 • Sale DG. Neural adaptation to resistance training. Med Sci Sports Exerc 20: S135-145, 1988.

• 60 • Sale DG, MacDougall JD, Upton AR, and McComas AJ. Effect of strength training upon motoneuron excitability in man. Med Sci Sports Exerc 15: 57-62, 1983.

• 61 • Sale DG, Upton AR, McComas AJ, and MacDougall JD. Neuromuscular function in weight-trainers. Experimental neurology 82: 521-531, 1983.

• 62 • Suga T, Okita K, Morita N, Yokota T, Hirabayashi K, Horiuchi M, Takada S, Takahashi T, Omokawa M, Kinugawa S, and Tsutsui H. Intramuscular metabolism during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction. J Appl Physiol 106: 1119-1124, 2009.

• 63 • Sugaya M, Yasuda T, Suga T, Okita K, and Abe T. Change in intramuscular inorganic phosphate during multiple sets of blood flow-restricted low-intensity exercise. Clinical physiology and functional imaging 31: 411-413, 2011.

• 64 • Takano H, Morita T, Iida H, Asada K, Kato M, Uno K, Hirose K, Matsumoto A, Takenaka K, Hirata Y, Eto F, Nagai R, Sato Y, and Nakajima T. Hemodynamic and hormonal responses to a short-term low-intensity resistance exercise with the reduction of muscle blood flow. Eur J Appl Physiol 95: 65-73, 2005.

• 65 • Tipton KD, Ferrando AA, Phillips SM, Doyle D, Jr., and Wolfe RR. Postexercise net protein synthesis in human muscle from orally administered amino acids. Am J Physiol 276: E628-634, 1999.

• 66 • Weatherholt A, Beekley M, Greer S, Urtel M, and Mikesky A. Modified KAATSU Training: Adaptations and Subject Perceptions. Med Sci Sports Exerc, 2012.

• 67 • Wernbom M, Augustsson J, and Raastad T. Ischemic strength training: a low-load alternative to heavy resistance exercise? Scand J Med Sci Sports 18: 401-416, 2008.

• 68 • Wernbom M, Augustsson J, and Thomee R. Effects of vascular occlusion on muscular endurance in dynamic knee extension exercise at different submaximal loads. J Strength Cond Res 20: 372-377, 2006.

• 69 • Wernbom M, Augustsson J, and Thomeé R. The Influence of Frequency, Intensity, Volume and Mode of Strength Training on Whole Muscle Cross-Sectional Area in Humans. Sports Medicine 37: 225-264, 2007.

• 70 • Wernbom M, Järrebring R, Andreasson MA, and Augustsson J. Acute Effects of Blood Flow Restriction on Muscle Activity and Endurance During Fatiguing Dynamic Knee Extensions at Low Load. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 2389-2395 2310.1519/JSC.2380b2013e3181bc2381c2382a, 2009.

• 71 • West DW, Burd NA, Staples AW, and Phillips SM. Human exercise-mediated skeletal muscle hypertrophy is an intrinsic process. The international journal of biochemistry & cell biology 42: 1371-1375, 2010.

• 72 • West DW, Burd NA, Tang JE, Moore DR, Staples AW, Holwerda AM, Baker SK, and Phillips SM. Elevations in ostensibly anabolic hormones with resistance exercise enhance neither training-induced muscle hypertrophy nor strength of the elbow flexors. J Appl Physiol 108: 60-67, 2010.

• 73 • West DW, Kujbida GW, Moore DR, Atherton P, Burd NA, Padzik JP, De Lisio M, Tang JE, Parise G, Rennie MJ, Baker SK, and Phillips SM. Resistance exercise-induced increases in putative anabolic hormones do not enhance muscle protein synthesis or intracellular signalling in young men. J Physiol 587: 5239-5247, 2009.

• 74 • West DW and Phillips SM. Anabolic processes in human skeletal muscle: restoring the identities of growth hormone and testosterone. Phys Sportsmed 38: 97-104, 2010.

• 75 • Wilborn CD, Taylor LW, Greenwood M, Kreider RB, and Willoughby DS. Effects of different intensities of resistance exercise on regulators of myogenesis. J Strength Cond Res 23: 2179-2187, 2009.

• 76 • Wilkinson SB, Phillips SM, Atherton PJ, Patel R, Yarasheski KE, Tarnopolsky MA, and Rennie MJ. Differential effects of resistance and endurance exercise in the fed state on signalling molecule phosphorylation and protein synthesis in human muscle. J Physiol 586: 3701-3717, 2008.

• 77 • Yamanaka T, Farley RS, and Caputo JL. Occlusion Training Increases Muscular Strength in Division IA Football Players. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 2523-2529 2510.1519/JSC.2520b2013e31823f31822b31820e, 2012.

• 78 • Yasuda T, Fukumura K, Fukuda T, Iida H, Imuta H, Sato Y, Yamasoba T, and Nakajima T. Effects of low-intensity, elastic band resistance exercise combined with blood flow restriction on muscle activation. Scand J Med Sci Sports, 2012.

• 79 • Nikituk, B., Samoilov, N. (1990) The adaptive mechanisms of muscle fibers to exercise and possibilities for controlling them. Teoriya i Praktika Fizischeskoi Kultury 5:11-14

• 80 • Ambrosio F, Kadi F, Lexell J, Fitzgerald GK, Boninger ML, Huard J. The effect of muscle loading on skeletal muscle regenerative potential: an update of current research findings relating to aging and neuromuscular pathology. Am J Phys Med Rehabil. 88(2):145-155, 2009.

• 81 • Anderson JE. The satellite cell as a companion in skeletal muscle plasticity: currency, conveyance, clue, connector and colander. J Exp Biol. 209(Pt 12):2276-2792, 2006.

• 82 • Kadi F, Eriksson A, Holmner S, Thornell LE. Effects of anabolic steroids on the muscle cells of strength-trained athletes. Med Sci Sports Exerc. 31(11):1528-1534, 1999.

• 83 • Kadi F, Thornell LE. Concomitant increases in myonuclear and satellite cell content in female trapezius muscle following strength training. Histochem Cell Biol. 113(2):99-103, 2000.

• 84 • Kadi F, Charifi N, Denis C, Lexell J, Andersen JL, Schjerling P, Olsen S, Kjaer M. The behaviour of satellite cells in response to exercise: what have we learned from human studies? Pflugers Arch. 451(2):319-327, 2005.

• 85 • Kadi F, Ponsot E. The biology of satellite cells and telomeres in human skeletal muscle: effects of aging and physical activity. Scand J Med Sci Sports. 20(1):39-48, 2010.

86 • Crameri RM, Langberg H, Magnusson P, Jensen CH, Schrøder HD, Olesen JL, Suetta C, Teisner B, Kjaer M. Changes in satellite cells in human skeletal muscle after a single bout of high intensity exercise. J Physiol. 558(Pt 1):333-340, 2004.

87 • Schoenfeld BJ. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. J Strength Cond Res. 24(10):2857-2872, 2010.

88 • Schoenfeld BJ. Postexercise hypertrophic adaptations: a reexamination of the hormone hypothesis and its applicability to resistance training program design. J Strength Cond Res. 27(6):1720-1730, 2013.

89 • Pootmans JR, Boisseau N. Biochimie des activités physiques. Bruxelles: Ed. De Boeck, 2e éd., 2003, 480 pages.

• 90 • Schuelke M, Wagner KR, Stolz LE, Hübner C, Riebel T, Kömen W, Braun T, Tobin JF, Lee SJ. Myostatin mutation associated with gross muscle hypertrophy in a child. N Engl J Med. 24;350(26):2682-2688, 2004.

• 91 • Smilios I, Pilianidis T, Karamouzis M, Tokmakidis SP. Hormonal responses after various resistance exercise protocols. Med Sci Sports Exerc. 35(4):644-54, 2003.

• 92 • Poliquin, C. Training for improving relative strength. S.P.O.R.T.S. 11: 1-9, 1991.

• 93 • Hawke TJ and Garry DJ. Myogenic satellite cells: physiology to molecular biology. J Appl Physiol. 91:534-51, 2001.

10

Comment développer sa souplesse ?

Sommaire

1 • Qu'est-ce que la souplesse ? 420

2 • Facteurs d'influence 421

Relation os, articulation, muscle et tendon 422
Tissu conjonctif 422
Tissu contractile 429
Système nerveux 429

3 • Les méthodes qui permettent de développer et de l'entretenir sa souplesse 431

Comprendre la terminologie 431
Méthode statique 440
Méthode PNF 442
Méthode dynamique 444

4 • Paramètres de programmation 446

La durée des étirements 446
Le nombre de répétitions 449
Fréquence des séances 450
Entraînabilité et programmation de la charge 451
Place dans la séance 453

5 • Étirements et performance 454

Comparer ce qui est comparable 454
Les étirements nuisent-ils à la performance musculaire ? 455

6 • Étirements, échauffement et prévention des blessures 458

Dissocier effets immédiats et chroniques 458
Une programmation réaliste et utile 458
Prévenir les blessures musculo-tendineuses 459
Le coin des bizarreries 467

7 • Explications des effets des méthodes de souplesse 470
Mécaniques, nerveux ou sensoriels ? 470
Et la méthode dans tout ça ? 470

8 • Conclusion 472

Bibliographie 473

"Quand nous ne voyons dans le corps vivant que grâce et souplesse, c'est que nous négligeons ce qu'il y a en lui de pesant, de résistant, de matériel enfin."

Henri Bergson, Le Rire, 1899.

"Dureté et rigidité sont compagnons de la mort. Fragilité et souplesse sont compagnons de la vie."

Lao Tseu

Nous avons abordé ce sujet dans la partie de notre site web consacrée à cette qualité physique[25].

Depuis 1998, date de notre première publication sur le sujet, notre vision des choses a beaucoup évolué. Pensez donc : il y a eu pas moins de 75 publications sur le thème stretching-muscle-souplesse depuis début 2010, plus de 180 depuis notre première publication, soit 1,6 fois plus qu'en 1980 et 2000. Aussi, afin d'alléger le contenu de ce chapitre, nous renvoyons le lecteur à ces pages pour en compléter les informations qui y figurent et pour ne parler ici que des données les plus récentes et les plus significatives dont certaines ont été déjà publiées (206, 207). Nous y ferons référence quand cela sera intéressant pour notre sujet.

1 • Qu'est-ce que la souplesse ?

C'est une qualité physique comme les autres. À ce titre, elle répond aux mêmes caractéristiques de spécificité, d'entraînabilité, de désentraînement, de programmation de la charge, etc. C'est la propriété intrinsèque des tissus qui détermine le degré de mouvement que l'on peut atteindre sans blessure au niveau d'une ou plusieurs articulations (105).

Cette amplitude est influencée par plusieurs facteurs que nous décrirons un peu plus loin.

Deux points sont importants à évoquer en préambule :

- Il faut bien comprendre que cette qualité peut s'exprimer de façon statique (posture) ou dynamique (mouvement), et que l'on n'a pas forcément de lien direct entre ces deux expressions. Par exemple, une gymnaste pourra faire facilement un grand écart au sol (posture) et avoir des difficultés à réaliser la même chose pendant un saut lors de sa prestation au sol que l'on appelle grand-jeté (mouvement) ;

25 / www.sciensport.fr (nouvelle version) ou www.sciensport.com (ancienne version).

- Tous les athlètes n'ont pas les mêmes besoins en regard de leur spécificité anatomique, physiologique, physique ou de leur spécialité sportive. Un gymnaste aura des besoins très spécifiques en lien avec le code de pointage international (règlement officiel des compétitions) alors qu'un cycliste n'a que faire d'avoir les mêmes amplitudes de mouvement.

Aussi, il convient de faire un état des réels besoins avant de s'engager dans tout programme s'intéressant à cette qualité.

2 • Facteurs d'influence

Pour commencer, donnons déjà les composantes que nous avons listées dans notre site avec quelques ajouts. Ces mises à jour ont été nécessaires car une meilleure compréhension des effets des méthodes d'entraînement de la souplesse passe par une connaissance tant globale que détaillée des structures en présence et de leur interaction.

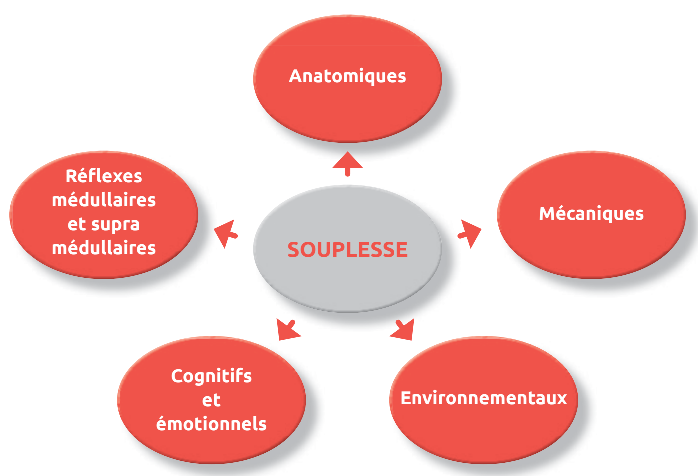


Figure 1 : Les facteurs d'influence de la souplesse. Les plus étudiés ont été les facteurs anatomiques (tissulaires notamment), mécaniques et nerveux (réflexes). Les facteurs cognitifs et émotionnels ainsi qu'environnementaux l'ont été beaucoup moins même s'il s'avère aujourd'hui que leur rôle est non négligeable dans certaines conditions.

Nous évoquerons aussi et surtout les facteurs qui sont les plus récents et qui s'avèrent les plus à même d'expliquer les phénomènes que l'on observe dans l'amélioration, le maintien ou la diminution de cette qualité physique. De la même façon, nous verrons le lien étroit qu'elle entretient avec d'autres qualités physiques comme la force, la puissance ou la vitesse.

Relation os, articulation, muscle et tendon

La forme de l'articulation est un premier élément pouvant expliquer les différences interindividuelles et entre les sexes. Les caractéristiques du fémur (acétabulum, col, etc.) (169) ont une incidence directe sur l'ouverture de la hanche et donc la souplesse du membre inférieur dans les plans sagittal et frontal, voire dans la survenue de certaines blessures ou pathologies (60). C'est pour cette raison que certaines écoles de danse demandent une radio de la hanche pour voir si l'enfant aura ou non des problèmes à exécuter certaines formes de technique.

La capsule articulaire est très résistante et limite fortement les mouvements de glissement articulaire tout en étant innervée de fibres sensitives (afférentes). De son intégrité dépend celle de l'articulation. C'est là que le muscle intervient. Sa raideur naturelle est généralement supérieure à celle de la capsule. Si on lui ajoute celle des tendons par lesquels il s'insère au squelette, on obtient une unité anatomique et fonctionnelle, ***l'unité muscle-tendon (UMT)***, dont la résistance à l'allongement est supérieure à celle de la capsule. Ainsi, l'intégrité de cette UMT est à son tour responsable de l'intégrité de l'articulation, d'où l'importance de la musculation.

Tissu conjonctif

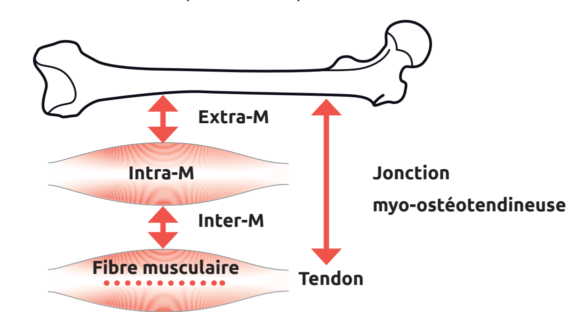
C'est le tissu élastique assurant le maintien et le lien entre les différentes structures anatomiques qui composent le corps. On le retrouve partout sous des formes très différentes (150) dont nous ne retiendrons que celles directement impliquées dans la souplesse. L'image qui prévaut aujourd'hui est davantage celle d'un continuum tissulaire qu'une simple addition de

parties distinctes. Cela s'étend de ce que l'on appelle la matrice extracellulaire, pour aller jusqu'aux éléments élastiques les plus intimes du sarcomère… le tout en 3D ! (14, 15, 75, 284).

Il est temps de se détacher des images qui nous sont données dans les ouvrages d'anatomie et de physiologie trop souvent planes pour nous plonger dans la vraie complexité de l'humain tel que nous avons pu le découvrir pendant nos séances de dissection. Des images exceptionnelles sont disponibles sur le lien suivant :
http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3177172/figure/F1/

De là à proposer l'utilisation du concept de tenségrité[26], il n'y avait qu'un pas. Celui de découvrir une solution élégante de mère Nature pour gérer les tensions, encaisser les contraintes, transmettre les forces d'un tissu à l'autre, du muscle au tendon ou du tendon à l'os par exemple.

Figure 2 : Les différentes composantes du tissu conjonctif dans l'appareil locomoteur ; Intra-M = intramusculaire ; Inter-M = intermusculaire ; Extra-M = extra-musculaire (75, 130, 150).



Extra-musculaire

On classe dans cette catégorie des aponévroses ou fascias, structures plus ou moins grandes et plus ou moins profondes sur lesquelles s'attachent les muscles via des digitations ou filaments de collagène et qui servent d'enveloppes. On les appelle souvent ***myofascia***. Elles sont aussi richement innervées et vascularisées. Leur rôle, trop longtemps négligé, oblige

26 / Terme inventé par Buckminster Fuller, compression de mot "tension" et "intégrité". Pour en savoir plus : http://www.bfi.org/

à reconsidérer leur implication en tant que soutien mécanique (263, 264), voire sensoriel, dans le contrôle des mouvements (112, 150, 297, 298).

Le tendon occupe une place particulière car il est à l'extrémité des muscles et s'insère sur le squelette. Son rôle n'est pas seulement de mobiliser les pièces osseuses grâce à la tension musculaire qu'il transmet car l'ensemble des enveloppes élastiques musculaires convergent vers cette structure. Il est capable aussi d'encaisser des contraintes mécaniques énormes s'exerçant à son niveau ; elles peuvent aller jusqu'à 1000 kg (155, 245-247, 262). C'est comme une interface assurant la transition entre le tissu mou qu'est le muscle et le tissu dur qu'est l'os.

Les fascicules musculaires sont en étroites relations avec la jonction myotendineuse (144). Ce qui va avoir des incidences sur les relations mécaniques qu'il entretient avec le muscle durant les sollicitations qui leur sont imposées (276), notamment dans le cas où plusieurs muscles s'insèrent sur un tendon commun comme les muscles du mollet (154). Les progrès réalisés en ultrasonographie ont permis d'analyser ces comportements chez l'homme et de mettre en évidence des forces de cisaillement au sein du tendon liées à ces tractions différentielles (30, 31)… ajoutant de nouvelles contraintes à celles déjà connues et donc de la complexité.

Intermusculaire

Les fascias ont un impact sur la manière dont le muscle réagit de façon active ou passive, mais aussi sur les interactions entre les muscles d'un même groupe, des muscles synergistes voire des muscles antagonistes. Il se produit des forces de cisaillement entre les muscles (11, 12) qui vont avoir une incidence sur le niveau de force active ou passive (147), qui peuvent participer à l'augmentation de la raideur d'un groupe musculaire ou d'une chaîne musculaire (31, 32, 113, 148, 149).

Tout comme les fascias extra-musculaires, ils sont aussi richement innervés et pourraient constituer des entrées sensorielles au contrôle du mouve-

ment ou de la douleur que l'on a négligée jusque-là et dont les interactions nous obligent aujourd'hui à changer là encore notre vision des choses (86).

Intramusculaire

En dehors de la fibre musculaire elle-même, on trouve des aponévroses qui compartimentent le muscle en alvéoles dans lesquelles se logent les fascicules ou faisceaux de fibres (250) ; ces structures assurent le maintien du volume musculaire pendant le mouvement tout en participant à la transmission de la force générée par les ponts d'union d'actomyosine (32, 208, 251).

Les mécanismes de transmission de la force en intramusculaire sont plus complexes qu'on ne l'imaginait au départ (297). Ces transmissions se font dans le sens de la fibre (longitudinal), ce qui est logique puisque le muscle va tirer sur les tendons selon la ligne de transmission de la tension passant par ces points d'insertion. Mais on sait aujourd'hui que les transmissions de la tension se font aussi au niveau latéral. Ce dernier point est important car il explique en partie les diminutions de force maximale (notamment isométrique) observées à de nombreuses reprises lorsque le sujet a des courbatures (73, 74, 110).

La dernière structure de la fibre musculaire que nous citerons est le ***cytosquelette*** ou squelette cellulaire (266, 267). Le sarcomère d'une fibre active étant par essence instable (1), il est impératif d'avoir une structure capable de maintenir en ordre, dans les trois dimensions, des protéines qui le composent et qui est sa marque de fabrique dans tous les livres de physiologie. De cet agencement tridimensionnel, quasi cristallin, dépend la quantité de recouvrement des myofilaments contractiles et donc la force que peut produire le muscle. Il consiste en un réseau de fibres dont le nombre de molécules s'est enrichi d'année en année, à mesure des progrès réalisés dans les méthodes de mesure, d'analyse, d'observation, en biologie moléculaire notamment. C'est par lui que circulent en premier les tensions, actives ou passives, qui sont générées au sein du muscle.

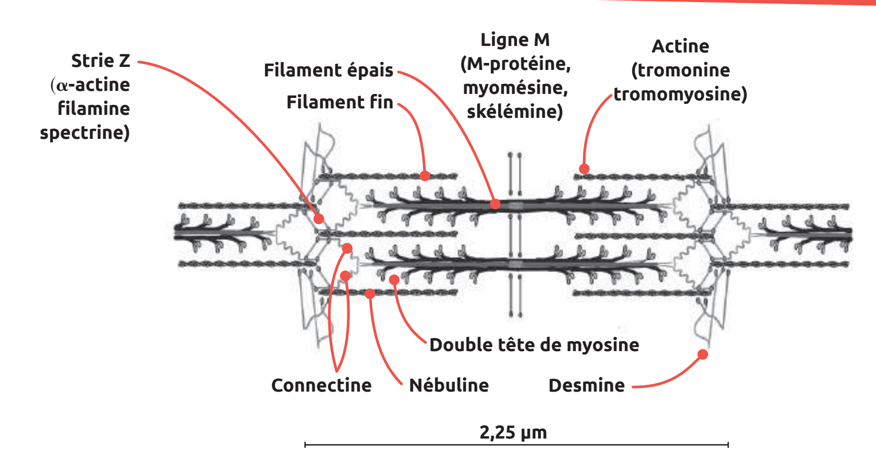


Figure 3 : Quelques-uns des éléments du cytosquelette du sarcomère (adaptée d'après 253).

On trouve par exemple parmi les plus importantes (234) :

- la desmine (52, 269) qui lie les fibres musculaires entre elles notamment en passant par les stries Z et se termine sur la membrane sur la dystrophine ;
- la dystrophine et ses protéines associées (ou costamère (29)) permet d'attacher les filaments d'actine, situés en dehors des sarcomères, à la matrice extracellulaire ;
- la famille des nébulines (46, 202, 269) dont l'une entretient des liens très étroits avec l'actine et en régule la position dans le sarcomère pour un meilleur contact avec la myosine (19, 42, 201, 203) ; mais elle aurait aussi un rôle important dans la régulation de la strie Z et dans l'hypertrophie au même titre que la titine que nous décrivons ci-dessous (199).

Histoire d'une petite voiture révolutionnaire

Mais il en existe une autre tout aussi importante pour la souplesse : la ***connectine*** ou ***titine***.

Elle a été trouvée par hasard dans les années 70 (167, 168, 170, 265, 268, 270). Elle apparaît très tôt dans la formation des myocytes (cf. phénomène d'hypertrophie) et se trouve être indispensable à la formation des sarcomères (78, 141, 253). Elle les traverse de part en part, d'une strie Z à l'autre,

et maintient ainsi la myosine en position centrale à la fois par rapport à la ligne M et par rapport aux deux stries Z qui délimitent le sarcomère.
De nombreuses études ont tenté d'apporter un éclairage sur son rôle dans le comportement passif (106-108) et actif (97, 109, 120, 183, 184) du muscle sur lesquelles nous reviendrons. En effet, en plus de jouer un rôle de support pour la myosine, elle possède des caractéristiques fondamentales pour l'intégrité de la myofibrille (146) mais aussi pour la compréhension du comportement mécanique du muscle lors des allongements passifs (étirements) et actifs (travail excentrique) en particulier :

1 • elle contient 2 zones d'extensibilité ayant des niveaux de raideur différents (77, 78, 145) ;
2 • elle entretient un lien direct avec plusieurs molécules de la strie Z et possède un site sensible à la concentration intramusculaire en calcium (69, 139), ce qui lui confère la particularité de voir son niveau de raideur ajusté en fonction de cette concentration (67, 79, 139).

Bien que connue depuis peu pour son implication dans la résistance à l'allongement passif du muscle (107), son rôle est devenu tellement prépondérant pour la mécanique musculaire que, comme d'autres, nous sommes arrivés aujourd'hui à la conclusion que la théorie des deux filaments (actine-myosine) est insuffisante. Elle ne peut rendre compte de certaines observations. C'est donc une théorie incomplète même si elle prévaut dans la physiologie du muscle depuis plus d'un siècle.
En revanche, on peut trouver des explications à ces phénomènes restés sans réponses dès lors que Carol Reed s'invite dans la partie avec "le 3e homme"… en la personne de "Titine". Nous pouvons enfin avancer dans notre compréhension de l'activation de nos muscles et avoir une vision plus globale de ce qu'ils sont capables de faire, de leur potentiel d'adaptation et de réaction (97).
Dans une revue très récente, Herzog et coll. (98, 100) ont listé des avantages à utiliser le ***modèle du sarcomère à 3 myofilaments :***

- *"Il assure la stabilité de sarcomères ;*
- *il centre les filaments de myosine dans le milieu du sarcomère ;*
- *il fournit une force croissante avec un étirement réalisé sur la branche descendante de la relation force-longueur lorsque les forces des ponts d'union basés*

sur l'interaction actine-myosine diminuent, et éventuellement deviennent nulles ;

- *il empêche le sur-allongement et les dommages des sarcomères ;*
- *il offre peu de résistance à l'extensibilité des muscles de façon passive mais résiste à l'étirement actif à travers une variété de mécanismes, fournissant de ce fait une force énergique économique dans les contractions excentriques.*

Nous suggérons que la titine est le troisième myofilament du sarcomère qui ne peut être négligé lorsqu'il s'agit de comprendre la contraction musculaire, la force et l'énergétique. ((98) p. 56)"

Des données nous montrent aujourd'hui qu'elle change de nature (77) selon l'espèce animale ou le muscle étudié (on parle d' "isoforme", comme pour la tête de myosine), s'adaptant ainsi de façon très spécifique à la fonction de celui-ci, et pourrait même avoir des liens avec certaines maladies (102, 103, 275).
La titine est aidée dans l'ajustement des myofibrilles du sarcomère par une autre structure située au niveau de la ligne M et composée d'un assemblage de 2 molécules principales (146, 196, 249) : la ***M-protein*** et la ***myomésine*** (Figure 3). Leurs proportions varient selon le type de fibres avec une dominante de myomésine pour les fibres lentes et une dominante de M-protein pour les fibres rapides (3). Les fibres rapides ayant pour rôle de produire un niveau élevé de force et/ou de vitesse, il est somme toute logique de constater que leur raideur est supérieure (17) à celle des types II au niveau de la ligne M. Étrangement (ou presque… on n'est plus à une surprise près maintenant), la myomésine a été décrite comme ayant un comportement élastique modulable (2, 229).
Enfin, en corollaire à tout ce qui a été dit sur le tissu conjonctif, ajoutons à cela la non-homogénéité de longueur des sarcomères (204, 273) dans les fibres musculaires pendant leur allongement ou leur raccourcissement. Ainsi nous aurons un éventail presque exhaustif de tous les éléments impliqués dans l'entraînement de la souplesse… plus particulièrement de l'influence des étirements sur la raideur musculaire et la performance musculaire, voire les (micro)traumatismes musculaires.

Tissu contractile

Ce tissu enferme plus d'une centaine de protéines, mais les deux les plus étudiées sont l'actine et la myosine, dont la seconde est le véritable moteur du mouvement car c'est de son union avec l'actine que résulte la génération d'une tension musculaire. La nature de ces deux myofibrilles est précisée dans le chapitre sur la force et la puissance. Rappelons ici que la nature de la tête des myosines qui composent une fibre musculaire, donne une idée des capacités de celle-ci à générer une force plus ou moins importante et/ou plus ou moins rapidement. Une énigme quasiment résolue est la raison de la présence de la double tête de myosine. Un étirement brutal du muscle entraîne une augmentation du nombre de ponts d'union en actine et myosine par fixation, notamment, de la seconde tête de façon quasi simultanée et non plus alternée (38, 39, 212).

Système nerveux

Plusieurs points importants sont à mentionner ici avant d'aborder les travaux récents concernant notamment les réflexes souvent évoqués pour expliquer certaines recommandations ou certaines méthodes relatives aux étirements dans les pratiques sportives et thérapeutiques.

Importance de la tâche

Les réflexes ont très longtemps été explorés dans des muscles isolés, afin d'en faciliter l'étude et de découvrir ainsi leur rôle dans le contrôle moteur, mais aussi leur implication dans la raideur musculaire sur laquelle nous reviendrons. Pour cette raison, des mouvements isolés simples (p. ex. flexion du coude) ont été utilisés. Cependant, en passant à des études in vivo, l'analyse de mouvements plus complexes, comme ceux de la locomotion à faible vitesse n'a pas permis dans un premier temps de retrouver les observations antérieures (115, 125, 230). Ce n'est qu'en utilisant des mouvements plus rapides que les réflexes se sont à nouveau manifestés comme le prévoyait la théorie (114, 116). Avec l'amélioration des outils de mesure, on est capable aujourd'hui d'utiliser des protocoles dits

"naturels", c'est-à-dire reproduisant les mouvements de façon plus proche de la réalité afin de se rendre compte de ce qui se passe avec plus d'objectivité et de justesse dans "la vraie vie".

Importance du sujet d'étude

On a découvert également que les résultats obtenus chez l'animal ne sont pas forcément équivalents à ceux obtenus plus tard chez l'homme. Le transfert des résultats de laboratoire d'une espèce à l'autre, d'un sexe à l'autre, d'un enfant à un adulte ou encore à un senior, doit donc se faire avec prudence. Quand on ne peut pas faire autrement, on utilise les travaux que l'on a à notre disposition, mais quand des données plus spécifiques ont été publiées, il est alors impératif de vérifier si les conclusions sont généralisables ou pas à d'autres individus.
Ne prendre en considération que ces évidences peut nous emmener dans des voies sans issue et nous faire passer à côté de choses importantes pour la compréhension des phénomènes couramment observés sur le terrain et jusque-là restés sans explications… alors que ça marche. En cela, l'emploi de formes de sollicitations plus conformes à ce que l'on voit en compétition ainsi que l'utilisation de matériels de plus en plus discriminants permettent de redonner de la cohérence ou "tout simplement" de faire une découverte majeure nous obligeant à revoir notre copie (68, 124).

Importance du contexte

Les réflexes sont loin d'être les choses figées comme on décrit très souvent dans les manuels : l'implication d'un réflexe n'est pas synonyme d'une réponse unique, stéréotypée, qui se reproduit à chaque fois à l'identique quand il est sollicité.
Les réflexes sont modulés en fonction du contexte, de la tâche à réaliser et de l'état initial dans lequel ils se trouvent au moment où ils sont sollicités (62, 180, 231, 232). En cela, des conclusions sur leurs actions ou leurs implications durant certaines techniques d'étirement ont peut-être été faites de façon erronée (43, 44, 178, 179).

3 • Les méthodes qui permettent de développer et d’entretenir sa souplesse

Comprendre la terminologie

Définir les modalités de sollicitation

Pour s’y retrouver parmi les méthodes qui existent, nous allons simplement les lister pour ensuite parler de leurs effets sur la souplesse et la performance. Nous avons fait une distinction entre ***étirements*** et ***assouplissements***. Cependant, les méthodes de sollicitation sont similaires à la base. Dans les assouplissements, on utilise des temps de maintien beaucoup plus longs dans la mesure où l’objectif principal est uniquement l’augmentation de l’amplitude articulaire. Par conséquent, les assouplissements sont réservés aux personnes ayant des besoins très spécifiques au niveau esthétique (danse, gymnastique artistique ou rythmique, etc.) ou technique (gymnastique artistique, escrime, certains sports de combat, certaines spécialités d’athlétisme, etc.). On peut aussi retrouver cette forme dans la proposition de prise en charge de certains problèmes musculaires (spasticité associée ou non à certaines maladies par exemple). Nous y reviendrons plus loin. Dans la pratique générale, ce sont le plus souvent les étirements qui sont utilisés, notamment dans le sport pour le maintien d'une certaine mobilité articulaire.

Le temps de maintien étant la principale différence entre ces deux formes, nous utiliserons le terme de ***"méthode de sollicitation"***, plutôt que d’étirements et d’assouplissements, afin de simplifier nos propos. Cela permet d’avoir une vision plus large, de donner de la cohérence à ce qui pourrait paraître contradictoire et ainsi de mieux comprendre ce champ d’investigation qui s’est beaucoup élargi et enrichi ces 10 dernières années.

À cela s’ajoute le fait que les chercheurs eux-mêmes donnent des noms différents pour une même méthode alors qu’ils sont censés parler de la même chose. Là aussi, on souhaiterait plus de cohérence. Ainsi, pour analyser et comparer ces méthodes, et surtout leurs effets, il est important de savoir de quoi on parle pour ensuite savoir quoi faire.

Mesurer les effets

Une autre raison à ce choix est liée à la terminologie mécanique utilisée pour qualifier les phénomènes étudiés.
Sur le terrain, la souplesse est généralement mesurée en faisant référence à une articulation et à la limite de mouvement autour de ses axes de mobilisation. Les Anglo-saxons utilisent le terme d'amplitude du mouvement ("range of motion", ROM) pour la caractériser. Mais d'un point de vue biomécanique, on fait plutôt référence à la raideur, à la compliance ou à l'hystérésis pour analyser cette souplesse d'un point de vue dynamique en l'abordant via la mécanique des matériaux. Cet angle d'attaque permet alors une exploration fonctionnelle des interactions entre les différentes composantes de la souplesse au niveau tissulaire et nerveux. Il permet aussi d'analyser leur contribution aux phénomènes observés sur le terrain, notamment les réactions à des forces extérieures que l'on impose lors de l'allongement d'un muscle passif ou actif.

Identifier les phases de sollicitation

Dans une mise en tension statique des ischio-jambiers chez un sujet en position allongée sur le sol par exemple, on observe plusieurs phases qui vont nous aider à comprendre comment sont analysés les étirements et comment ils agissent sur le système muscle-tendon. La Figure 4 illustre ce phénomène.

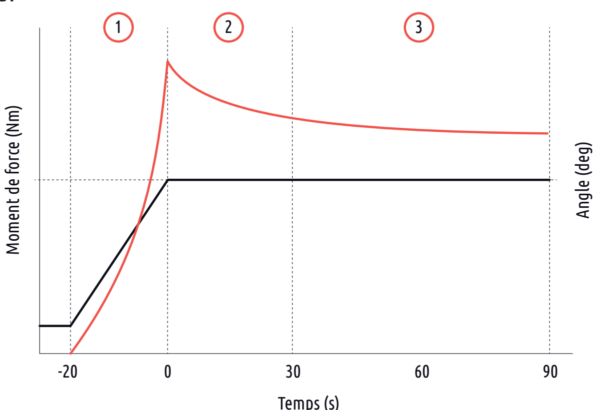


Figure 4 : Les phases d'une mise en tension d'un muscle (d'après Magnusson (152)).

Phase de mise sous tension

1 • Mise sous en tension (ligne noire) avec augmentation de la résistance (axe vertical gauche) à l'allongement (rouge) jusqu'à un angle donné correspondant à la ligne de tirets grise exprimé en degré (axe vertical droit).

Phase de maintien de la tension

2 • Maintien sur 90 s (axe horizontal) de l'angle au seuil de douleur supportable avec une phase (composante rapide) de diminution de la résistance à l'allongement ou relâchement de force/résistance.

3 • Puis une seconde phase (composante lente) où il y a moins de diminution du relâchement de la résistance.

Quantifier les effets

Le paramètre qu'on évoque très souvent en parlant de souplesse est la raideur. Mais ce n'est pas le seul qui soit utilisé pour mesurer les effets de la souplesse. Lorsqu'on tire sur un muscle, on peut exprimer le résultat de la mesure de différentes façons selon les dimensions musculaires retenues et les propriétés mécaniques étudiées (151, 271) :

Tableau 1

PARAMÈTRE MUSCULAIRE	PARAMÈTRE MÉCANIQUE ET CONCEPT LIÉ
Longueur	• extensibilité musculaire → capacité à s'allonger jusqu'à un angle prédéterminé ou à un niveau de douleur ressenti.
Tension ou force	• raideur musculaire → résistance obtenue à une longueur donnée ; • compliance musculaire → inverse de la raideur → longueur obtenue en imposant un niveau de tension donné ; • énergie → correspondant à l'aire sous la courbe longueur/force ; • hystérésis → mesure de l'énergie dissipée pendant la phase de décharge.
Surface de la section transverse	• stress → tension par unité de surface de section transverse ; • raideur, compliance, énergie, hystérésis normalisée par rapport à l'épaisseur du tissu.
Temps	• relaxation du stress visco-élastique → diminution de la résistance pendant une mise sous tension qui se produit durant l'application d'un étirement statique passif ; différence (pourcentage) entre la valeur maximale et la valeur finale obtenue après une certaine durée d'étirement ; • déformation en longueur ("creep") → augmentation de la longueur du muscle pendant l'application d'une force constante.

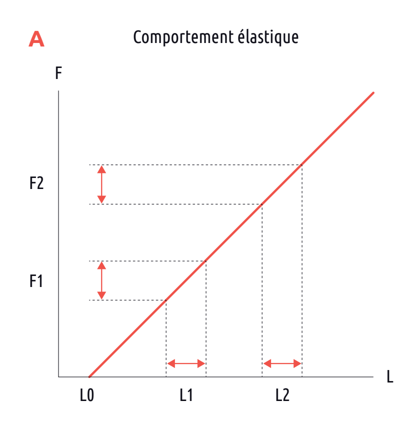
Les unités de mesure utilisées seront selon le cas :
- Force (N) vs Longueur (mm) ;
- Moment (Nm) vs Angle (deg) ;
- Contrainte (MP0) vs Déformation (% L0) où P0 et L0 (mm) sont les valeurs de repos ;
- Raideur (N/mm) vs Force (N) ;
- Module de Young (GPa) vs Contrainte (Pa).

On le voit, il n'est pas évident de s'y retrouver quand on n'est pas habitué à manipuler ces notions. Encore moins quand le terme est utilisé en dehors du contexte mécanique dont il est issu. Par exemple, ***en biomécanique, les termes raideur, compliance et élasticité sont synonymes… ce qui n'est pas le cas dans le langage courant.***

Comprendre les déformations mécaniques

Cependant, l'une des raisons de la difficulté à comprendre ce qui se passe dans les étirements et, par là même, l'une des raisons des interprétations erronées avancées pour justifier de faire ou non des étirements, est en grande partie reliée à la confusion de la terminologie mécanique utilisée pour qualifier les phénomènes étudiés. Si l'on reprend la phase 1 de la Figure 4 où l'on fait un étirement unique à angle constant, c'est-à-dire que l'on positionne une articulation dans une position correspondant au seuil de douleur supportable par la personne (par exemple 70° à l'articulation de la hanche pour une tension imposée aux ischio-jambiers), on observe un phénomène particulier : la résistance à l'allongement n'est pas linénaire mais curvilinéaire. Ce phénomène est lié au fait que nous avons affaire à un organe composé de différents tissus (contractile et élastique notamment) et que ces tissus interagissent pour donner ce résultat.
Le comportement du muscle n'est pas élastique (linéaire) mais ***visco-élastique (curvilinéaire)***. Ce comportement visco-élastique est lié au fait que le muscle est très schématiquement composé d'un matériau solide (élasticité) et d'un matériau liquide (viscosité). Cela le rend dépendant de l'intensité, de la durée et de la fréquence avec laquelle on lui impose une contrainte.

Une contrainte appliquée à un angle proche du seuil de douleur (▲ figure 5b) entraîne une réaction tissulaire beaucoup plus importante que celle observée à un angle proche de la position à mi-chemin entre cet angle maximal et la position de repos (● figure 5b). L'effet est exponentiel. C'est ce qu'illustre la figure suivante.



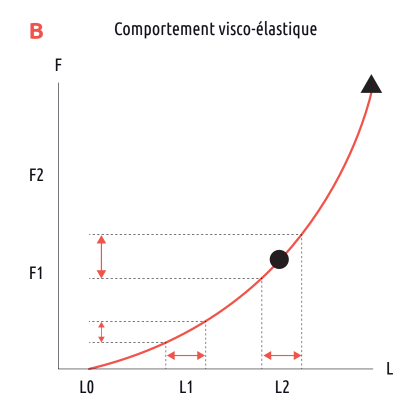


Figure 5 : Différence entre élasticité et visco-élasticité.
A • Dans l'élasticité, il y a une relation linéaire entre le degré d'allongement et la force qui en est la cause ; on aura toujours la même résistance à l'allongement quel que soit le moment où l'on mesure cette valeur.
B • Dans la visco-élasticité, la relation entre l'allongement et la force qui le provoque est curvilinéaire ; on aura des valeurs de résistance plus élevées en fin d'allongement.

Les termes ***d'élasticité*** et ***d'extensibilité*** sont différents. Ils ont leur importance dans la compréhension des effets des méthodes d'entraînement de la souplesse.

L'extensibilité s'intéressera aux valeurs maximales obtenues à la fin de la mise en tension (longueur ou angle maximaux). C'est la partie visible de l'iceberg, la partie observable du phénomène. À elle seule, elle ne peut donc nous renseigner sur ce qui se passe au sein du muscle et nous oblige à utiliser une approche multifactorielle pour rendre compte des adaptations du système muscle-tendon et de l'efficacité des méthodes utilisées pour entraîner la souplesse.

L'élasticité est la capacité d'un tissu à s'allonger puis à retourner à sa longueur initiale une fois la contrainte disparue. La raideur est donc synonyme d'élasticité tout comme la compliance : une grande élasticité est synonyme de meilleure compliance ou plus faible raideur ; et une faible élasticité est synonyme de plus grande raideur ou de faible compliance. Ces deux paramètres sont reliés mathématiquement puisque l'un est la réciproque de l'autre (Raideur = 1/Compliance). Si l'une augmente, l'autre diminue. Mais le tout permet d'expliquer la même chose (élasticité) selon 2 points de vue différents.
Bien évidemment, ces deux paramètres mécaniques qui caractérisent le muscle (avec l'excitabilité et la contractilité) sont fortement corrélés. Il est pourtant des cas où les choses ne sont pas si évidentes. Nous en reparlerons notamment dans la partie qui essaie d'expliquer ce qui se passe dans le muscle lors des étirements à court et à long terme.
Pour caractériser la raideur, on mesure simplement la pente de la courbe à différents endroits pour voir comment elle varie pendant l'étirement du muscle. La valeur la plus élevée (raideur maximale) est atteinte au seuil de douleur tolérable… c'est-à-dire au moment où la pente est la plus "raide"… ça ne s'invente pas.

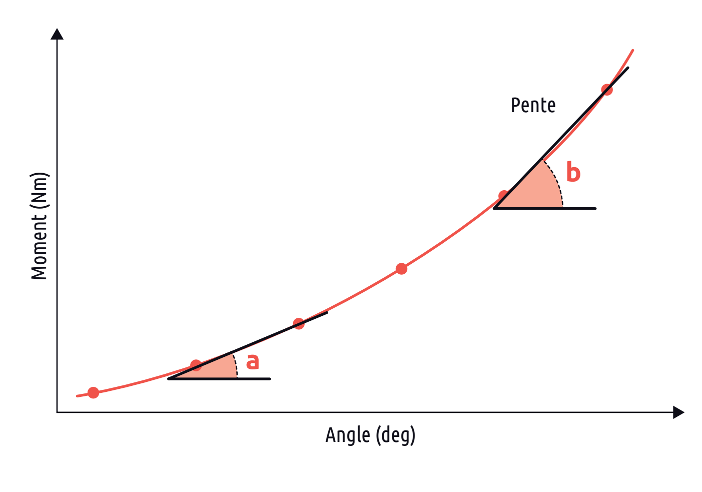


Figure 6 : Mesure de la raideur musculaire à partir de la pente de la relation Force/Longueur ou Moment/Angle. L'angle a est plus petit que l'angle b. La raideur du muscle est donc plus faible au début de l'étirement (a) qu'à la fin de l'étirement (b), au moment où l'on a mis en tension les structures élastiques. La raideur maximale est la pente la plus importante que l'on peut voir sur cette courbe au moment où l'on atteint généralement le seuil de douleur tolérable.

Si l'on impose une tension à un tissu et qu'on la supprime, un autre phénomène se produit : ***l'hystérésis*** (Figure 6). Il s'agit d'un phénomène de déperdition d'énergie par déformation et production de chaleur.

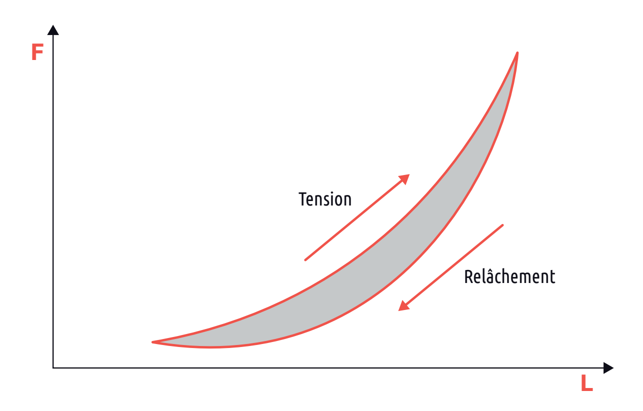


Figure 7 : Dissipation d'énergie par hystérésis. Lors d'un étirement, le chemin aller et le chemin retour de la courbe tension-longueur ne sont pas les mêmes. Il y a une dissipation d'énergie liée à la déformation subie. La perte d'énergie entre la mise sous tension (aller) et le relâchement (retour) est la surface qui sépare ces deux courbes (gris). Plus la surface est grande, plus la déformation subie est élevée et plus la contrainte imposée est importante.

Ce mécanisme dépend non seulement de l'amplitude de l'étirement mais aussi de ce que le muscle a subi comme contraintes mécaniques juste avant (niveau d'allongement à la fin de l'étirement précédent, temps de maintien du précédent étirement, vitesse d'application de l'étirement, etc.). Pour vous en convaincre, étirez le muscle de quelqu'un 10 fois de suite à un même angle (10 x 30 secondes par exemple). Vous observerez le phénomène suivant (Figure 7) : la résistance à l'allongement pendant la mise en tension (moment de force passive) sera plus élevée au premier qu'au dixième étirement. En revanche, la diminution de résistance enregistrée lors de la phase de relâchement sera similaire. En d'autres termes, il est plus facile d'allonger le muscle au dixième étirement qu'au premier. Il oppose moins de résistance car il subit moins de contraintes internes et il encaisse mieux la déformation imposée.

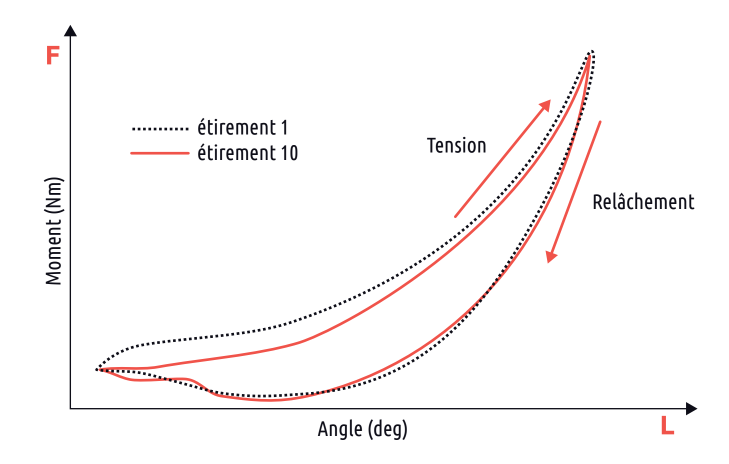


Figure 8 : Déperdition d'énergie lors d'un cycle de 10 étirements. Au 10e étirement (trait plein), on note que le muscle oppose moins de résistance à l'allongement. La courbe ascendante se déplace vers la droite. En revanche, il n'y a pas de différence au niveau de la courbe descendante lors du relâchement. D'après Magnusson et coll. (153).

Au-delà d'un certain nombre de cycles, la déformation risque d'être durable et le muscle peut ne plus pouvoir revenir à sa longueur initiale, surtout si l'on dépasse la zone d'élasticité et qu'on entre dans la zone de plasticité du tissu (celle où se produisent les microlésions). On aura créé une blessure de type élongation s'il n'y a pas de rupture de fibres musculaires, ou une courbature, voire une déchirure musculaire s'il y a rupture de fibres (voir la partie concernant étirements et blessures).

Reprenons l'étirement décrit à la Figure 4. On observe dans la phase 2 une diminution importante de la résistance à l'allongement (ou moment de force puisqu'on maintient l'articulation à un angle correspondant au seuil de douleur tolérable). Puis, dans la phase 3, après une trentaine de secondes de maintien de l'angle au seuil de douleur tolérable, cette diminution se fait moins rapidement pour quasiment se stabiliser. Ce phénomène qui se produit lorsqu'on maintient ***un angle constant*** est appelé ***relâchement de force*** et se manifeste lorsque la longueur du muscle est maintenue constante pendant un étirement.

Maintenant, imaginons que ce ne soit pas l'angle qui soit constant mais ***le moment de force*** (c-à-d la part de la force responsable de la rotation articulaire). On verra ce que les Anglo-saxons appellent le ***"creeping"***, c'est-à-dire un ***allongement lent et progressif*** d'un tissu pendant le maintien d'une tension constante. On note alors une augmentation de l'angle articulaire lorsque la force de traction est maintenue constante pendant un étirement. De la même façon que précédemment, ce phénomène se fait en 2 phases : l'une rapide, l'autre lente (222, 224).

Comparer les effets

Prenons la méthode la plus simple : la méthode statique. Les protocoles vont varier en termes de sollicitations imposées au groupe musculaire (souvent les ischio-jambiers car plus faciles à gérer et souvent l'objet des fréquences de blessures les plus élevées dans bon nombre de pratiques sportives). Mais là où les choses se compliquent, c'est quand plusieurs paramètres mécaniques sont utilisés en même temps : angle, moment de force, raideur, allongement musculaire jusqu'au seuil de douleur supportable non maximal. Ce dernier est le plus discutable car le plus difficile à évaluer et le moins souvent mesuré… pourtant beaucoup d'études le citent comme étant le paramètre de contrôle de mise sous tension du muscle maîtrisé par le sujet. On peut néanmoins essayer de contourner le problème en faisant appel aux échelles visuelles analogiques (comme l'échelle de Borg ou RPE, échelle allant de 6 à 20 ou de 0 à 10). Ces échelles permettent d'avoir un retour subjectif sur le ressenti de la personne et d'ajuster ainsi l'intensité de la charge de travail par rapport à celui-ci.
La diversité des protocoles, des personnes étudiées, des conditions expérimentales rend quelquefois (pour ne pas dire souvent) impossible les comparaisons entre les publications pour essayer d'en tirer des recommandations tant générales que spécifiques. Peu d'études ont impliqué des athlètes expérimentés rendant incertain le transfert vers la performance de haut niveau. Même l'utilisation d'outils statistiques adaptés à ce type d'exercice, comme les effets de taille ("size effect"), reste problématique à cause de la diversité des études.

On retrouve le même problème lorsque l'on compare les $\dot{V}O_2$max relatifs (exprimés en ml/min/kg) de deux personnes. Selon Rowland (217), seules les personnes de ***même composition corporelle*** peuvent être comparées entre elles, compte tenu de l'influence de la maturité et de l'entraînement sur celle-ci, et son implication sur la condition physique aérobie.
Prenons par exemple l'opposition qui est souvent faite entre raideur et souplesse avec l'idée qu'une augmentation de l'une ne peut se faire qu'au détriment de l'autre. En gros, on ne peut pas être fort, puissant et souple à la fois puisque la raideur musculaire est, semble-t-il, un paramètre important de la qualité de production de force et puissance musculaire (277, 279). Notre (mé)connaissance actuelle des effets mécaniques, nerveux, voire d'autres moins documentés, sur la raideur et la souplesse doit nous obliger à rester prudent quant à des positions aussi catégoriques.

La démonstration de cette prudence a été donnée par Wilson et coll. (278) qui ont montré qu'un entraînement de 8 semaines en souplesse chez des powerlifters pouvait améliorer la puissance musculaire et la vitesse de développement de la force (explosivité). Plus récemment, un travail d'une équipe australienne (213) a démontré qu'en utilisant trois fois par semaine pendant 4 semaines la méthode PNF chez des femmes actives, la souplesse de l'articulation de la cheville augmentait… jusque-là rien de nouveau. Là où cela devient intéressant, c'est que la force isométrique maximale et le taux de développement de la force (en gros l'explosivité) avaient augmenté en parallèle ! Un point sur lequel nous reviendrons dans la partie consacrée à "Étirements et performance".
Ces études, comme d'autres sur le même thème, montrent que **raideur et extensibilité sont deux composantes interdépendantes de l'unité muscle-tendon, et qu'elles peuvent être sollicitées et entraînées de façon indépendante et/ou conjointe** en utilisant une méthode et un protocole appropriés.

Méthode statique

C'est la méthode qui a été la plus étudiée car elle a intéressé le domaine médical et paramédical par sa simplicité d'utilisation. Elle consiste à adop-

ter une posture donnée, tout en exerçant une tension sur le groupe musculaire ciblé. On place généralement une articulation à un angle correspondant à la position où la douleur est supportable par le sujet, mais non maximale. Il existe aujourd'hui deux modalités d'utilisation de cette méthode : à angle constant ou à moment constant.

Angle constant

Il s'agit de mettre en tension un groupe musculaire jusqu'au seuil de douleur tolérable. On obtient alors un angle maximal tel que décrit dans la Figure 5B. On peut relâcher la tension appliquée en diminuant l'angle et revenir dans la même position, on parle d'***étirement statique à angle constant***.
Prenons un exemple. A) On aide une personne allongée à fléchir son membre inférieur en appliquant une pression sur le talon. B) Lorsque la personne considère qu'elle a atteint son seuil de douleur supportable (mais non maximal), on maintient cette position pendant une durée donnée. On note que l'angle est de 80° par rapport à la position de départ (0°). C) Puis, on relâche la tension pendant 5 s en revenant à un angle de 70°. D) Enfin, on revient dans la position précédente (80°). Une variante est le "*stretch-relax-hold-relax*" (SRHR).
En utilisant cette méthode, il a été démontré que la répétition d'un étirement sous cette condition induit une diminution de la force de résistance à l'allongement : il est de plus en plus facile de mettre en tension le muscle à un angle donné (158). Ce phénomène est décrit comme un relâchement de la résistance du muscle (relaxation visco-élastique).

Moment constant

Le moment d'une force musculaire est la composante de la force qui est responsable de l'effet de rotation autour d'une articulation.
Si l'on reprend l'exercice précédent de mise sous tension des ischio-jambiers, on va commencer la procédure de la même façon (A, B, C), mais dans la dernière phase, on ne revient pas à l'angle précédent : on va un peu

plus loin pour atteindre le nouveau seuil de douleur tolérable. En faisant ainsi, on tente d'appliquer une contrainte (moment de force) constante pendant toute la durée de l'étirement.
Cette différence de sollicitation est importante car les travaux très récents montrent des bénéfices supérieurs dans les étirements à moment constant (91, 222) par rapport aux étirements à angle constant, utilisés initialement chez les patients atteints de spasticité musculaire[27] suite à un accident vasculo-cérébral (252, 290-292).

Statique ou cyclique

Nous l'avons évoqué plus haut, ces deux méthodes se distinguent simplement par le fait qu'un temps de pause est inséré entre 2 étirements statiques alors que ce n'est pas le cas dans les étirements cycliques. Les deux méthodes peuvent se faire à angle ou moment constant.

Méthode PNF

PNF est l'acronyme de "facilitation neuromusculaire proprioceptive" (Proprioceptive Neuromuscular Facilitation). Par "neuromusculaire", on entend l'implication de circuits nerveux réflexes censés avoir une incidence sur le niveau de relâchement musculaire (122, 233, 260). C'est un ensemble de techniques issues du milieu de la thérapie manuelle, utilisées notamment chez des patients atteints de maladies ou traumatismes neurologiques (122, 123, 260).

Les réflexes qui seraient impliqués

On peut en lister quelques-uns :

- Le réflexe d'inhibition autogénique (réflexe myotatique) qui provoque la contraction musculaire résultant de l'allongement important et/ou rapide des fuseaux neuromusculaires.

27 / Augmentation exagérée et permanente du tonus musculaire de repos suite à une maladie neurologique (tumeur, problème vasculaire, neurodégénérative).

- Le réflexe d'inhibition inverse (réflexe myotatique inverse) qui correspond à un relâchement musculaire suite à l'activation des organes tendineux de Golgi par la tension exercée sur les tendons.
- Le réflexe d'inhibition réciproque qui intervient dès lors qu'on souhaite activer un muscle en flexion et que l'antagoniste (extenseur) est inhibé pour permettre au mouvement de se faire.
- Le réflexe d'inhibition croisée qui correspond par exemple à l'inhibition des extenseurs du genou pendant qu'on active les extenseurs du côté opposé.
- La boucle gamma dont le rôle est de régler la sensitivité des fuseaux neuromusculaires et ainsi agir sur le tonus musculaire, elle-même étant sous l'influence d'un groupe de neurones appelés "formation réticulaire" située dans le tronc cérébral.

L'implication de ces différents réflexes est sujette à discussion notamment concernant l'implication des organes tendineux de Golgi dans la technique du contracter-relâcher et du circuit d'inhibition réciproque (43, 44, 177, 178) comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe consacré au Système nerveux.
Comme pour la méthode statique, il est demandé au sujet de maintenir une articulation à un angle donné. Cependant, une contraction musculaire va être utilisée soit avant, soit pendant cette phase de maintien.
La terminologie varie souvent d'un ouvrage à l'autre, d'une publication à l'autre, ce qui rend difficile la comparaison entre les protocoles, et rajoute à la confusion déjà importante des méthodes PNF.

Les modalités

On parlera de "muscle cible" pour évoquer celui sur lequel se fera l'allongement, de "muscle opposé" pour désigner l'antagoniste du muscle allongé (muscle cible) tel que proposé par MacAtee et Charland (171).

- Le contracter-relâcher (CR) est la contraction du muscle cible faite avant qu'il ne soit allongé jusqu'au seuil de douleur tolérable.

- La contraction de l'antagoniste (CA) est la contraction du muscle opposé à celui qui va être allongé.
- La combinaison de ces deux modalités donne le CRAC : acronyme de *"contract-relax-antagonist-contraction"*… rien à voir donc avec une drogue quelconque). La procédure commence par une contraction du muscle cible suivie de son allongement au seuil de douleur, moment où l'on engage le muscle opposé en le contractant. On espère ainsi cumuler les effets des différentes modalités.

Méthode dynamique

Méthode du mouvement dynamique

Il s'agit ici de faire des mouvements lents et de grande amplitude. Les muscles antagonistes sont sollicités ici pour produire les forces nécessaires à la mise sous tension du groupe musculaire ciblé. Elle se fait sans à-coups et de façon contrôlée.
C'est la forme que l'on retrouve le plus souvent dans l'échauffement car elle mime des mouvements ou contraintes que l'on va rencontrer durant la séance en termes d'amplitude. Par ailleurs, elle prépare au cycle naturel du muscle pendant la performance (cycle étirement-détente) et a démontré son efficacité surtout lorsqu'elle fait partie intégrante d'un processus de préparation à l'effort progressif (45, 255, 256).

Méthode balistique

Dans cette méthode, on reprend la forme dynamique précédente mais avec un angle plus réduit et/ou une vitesse plus rapide. Elle complète la forme précédente. C'est ce que l'on fera en danse pendant un battement par exemple ou lors d'un travail à la barre.
Le bénéfice attendu d'une telle méthode est dans la préparation du muscle au cycle naturel d'allongement-contraction ("étirement-raccourcissement" disent certains). L'adaptation immédiate et chronique, à des exercices de pliométrie par exemple, illustre comment les réflexes peuvent

être modulés pour favoriser la puissance musculaire. Cette adaptation est très spécifique. Il est donc recommandé d'utiliser des exercices proches du geste compétitif pour favoriser le transfert. C'est quasiment un pré-conditionnement neuromusculaire dont nous reparlerons dans le chapitre consacré à la puissance.

Méthode par rebonds

Quand on l'évoque, cette forme de sollicitation fait bondir certains car on la retrouve dans les pratiques de gymnastique dite "naturelle". Cependant, quelques rares travaux ont remis au goût du jour cette forme de mobilisation en démontrant des effets différents en comparaison avec la méthode statique (162). Cette dernière affecte principalement la force de résistance passive du muscle en la diminuant, alors que la méthode balistique cible davantage les structures élastiques du tendon en diminuant sa raideur après 6 semaines d'entraînement. Elle ne sera donc pas la plus à même d'améliorer la souplesse (162, 261). Ceci expliquerait pourquoi les travaux antérieurs avaient démontré une moins grande diminution de raideur musculo-tendineuse en utilisant des étirements "cycliques" (35, 153).

Elle est similaire à la méthode balistique mais elle se concentre sur la fin de l'amplitude de mouvement avec des petits mouvements oscillatoires. Ce sont les petits mouvements que font certains lanceurs de javelot par exemple avant leur lancer, c'est-à-dire un va-et-vient rapide au niveau de l'articulation de l'épaule sur une faible amplitude.

Certains pensent que la méthode par rebonds ou méthode ressort est trop utilisée dans le milieu sportif, surtout sur la chaîne postérieure (ischio-jambier). Les étirements de fin d'effort réalisés avec cette forme de travail risquent de léser le muscle par étirement brutal des fibres s'ils sont associés au réflexe myotatique. Nous préférerons faire appel à la même forme de travail dénommée méthode "par oscillation" en demandant au sportif d'osciller sur la respiration. Inspiration (relâchement) et expiration (étirement).

4 • Paramètres de programmation

La durée des étirements

C'est l'un des points les plus importants qui permettent d'expliquer la disparité des résultats que nous évoquerons à nouveau quand nous parlerons du lien entre "étirements et performances" ou "étirements et blessures".

Pour un seul étirement

Si l'on est quelque peu pris par le temps ou simplement que l'on n'a pas que ça à faire (par fainéantise ?) mais que l'on veut malgré tout s'étirer, quelle doit être la durée de cet étirement dans la méthode statique ?

La réponse est de **30 secondes** (16-18, 64) mais ce temps peut être raccourci ou un peu allongé selon que l'on a l'habitude ou non de le faire, selon que l'on maîtrise ou non la technique et la posture et selon que l'on connaît bien ou pas son anatomie fonctionnelle. Dans tous les cas, il ne peut être inférieur à 20 secondes et supérieur à 45 secondes. Avec la méthode PNF, cette durée peut être raccourcie. Pour la fréquence hebdomadaire et pour les effets sur la performance, nous vous proposons de lire le paragraphe qui leur est consacré un peu plus loin. Récemment, cette durée a été validée par une mesure des effets inhibiteurs en fonction de la durée de l'étirement sur la production de force du quadriceps (238).

Pour l'augmentation de l'angle articulaire de façon plus spécifique comme pour la gymnastique, la danse, et autres disciplines déjà citées, on peut dépasser les 60 secondes ou adopter des postures qui changent les contraintes fonctionnelles sur le groupe musculaire ciblé et les faire les unes après les autres en respectant le seuil de douleur bien évidemment. La raison en est expliquée dans le paragraphe consacré aux effets des étirements.

Pour une séquence d'étirements

• Commençons par la souplesse passive.
Par durée, on peut entendre la "durée d'un étirement isolé" ou la "durée totale d'une séquence d'étirements". En d'autres termes, est-ce qu'il faut faire un seul étirement de 2 min ou 6 étirements de 20 secondes ? Est-ce que l'un est plus efficace que l'autre ? En comparant les effets d'un même protocole sur chacune des jambes d'un même individu[28], Cipriani et coll. (48) ont démontré que ce n'est pas la durée d'un étirement dans une séquence mais la ***durée totale des étirements*** qui était le paramètre important. Ainsi, 6 x 10 s ou 3 x 20 s donnent des effets similaires au niveau gain en amplitude. Ces résultats ont été obtenus par d'autres (10, 216, 227) y compris chez des sujets plus jeunes (299). En pratique, selon le seuil de tolérance à la douleur de la personne, on fera un premier étirement de calibration en fonction de ce seuil (p. ex. 15 s) et on le répétera jusqu'à compléter la durée totale souhaitée ; (p. ex. sur une durée totale de 2 min environ, on fera 8 répétitions de 15 s séparées de 2 à 5 s maximum).

• Qu'en est-il de la souplesse active ?
Si l'on souhaite améliorer principalement la ***souplesse active***, cette équivalence de protocole n'est plus valable. Roberts et Wilson (216) ont montré qu'une programmation (5 semaines ; 3 x par semaine) de contracter-relâcher de 3 x 15 s était équivalente à 9 x 5 s pour améliorer la souplesse passive. Mais la séquence [3 x 15 s] était supérieure à [9 x 5 s] pour augmenter la souplesse active.
Donc, même si la durée totale reste importante, la durée d'un étirement dans la session est un paramètre essentiel à prendre en compte pour la spécificité de l'entraînement qu'elle permet. D'une façon générale, on préférera utiliser la méthode PNF pour cette souplesse puisqu'elle est considérée comme étant plus efficace sur une période donnée (18, 40, 57, 88, 89, 225, 242). Nous avons ici la démonstration que la souplesse, comme toutes les qualités physiques, répond au principe de spécificité dans certaines conditions.

28 / Cela réduit les effets aléatoires liés à l'échantillon de personnes recrutées.

Durée de contraction dans la méthode PNF

Toujours concernant cette méthode PNF, un flou règne quant à la durée maximale ou optimale de contraction à utiliser dans le CR ou le CRAC. On trouve des délais allant de 1 seconde à plus de 60 secondes.
Pour tenter de répondre à cette question, Guissard et coll. (83) ont analysé l'effet d'une contraction maximale isométrique volontaire (CMV) sur le taux de diminution d'activité des motoneurones du muscle soléaire. Résultat : que la contraction dure 1 s ou 10 s ou 30 s ne change rien à l'inhibition des motoneurones innervant ce muscle. Des résultats similaires ont été obtenus avec des durées de maintien de 3, 6, 10 s répétées 3 fois (33). L'activation du réflexe myotatique se faisant en quelques dizaines de millisecondes (35 à 45 ms), il est plutôt logique qu'avec un temps au moins 25 fois supérieur (1000/40 ms = 25), on ait déjà un effet sur ce mécanisme nerveux. Cornelius et Rauschuber (50) ont montré la même chose pour l'étirement impliquant la contraction du muscle antagoniste : pas de différence entre une contraction de 6 ou 10 secondes avec la méthode SRHR (cf. p. 460 et suivantes).

Intensité de contraction dans la méthode PNF

C'est la même chose pour l'intensité de la contraction musculaire. On trouve des intensités qui vont de 10 à 100 % de la CMV.
En s'intéressant à l'utilisation d'une contraction sous-maximale (plutôt que maximale) dans la méthode PNF, il a été démontré que l'on obtenait les mêmes gains avec 20 %, 60 % ou 100 % de la contraction maximale volontaire (59) dans le contracter-relâcher.
Mais les choses seraient idéales si l'on pouvait contrôler exactement l'intensité de la CMV sur le terrain… tout le monde ne dispose pas d'un appareil de biofeedback. D'où la question : "et si on se tolère une petite marge d'intensité, de combien peut-elle être ?" En d'autres termes, existe-t-il un optimum autour duquel se situer sans faire trop d'erreur et obtenir les meilleurs gains ? En utilisant un large éventail d'athlètes (56 hommes et femmes), Sheard et Paine (235) ont démontré que les gains les plus élevés sont obtenus avec une intensité d'environ 60-65 % de la CMV.
Conclusion, quand on peut faire moins, pourquoi faire plus ? **1 à 3 secondes à 60-65 % de la CMV suffisent pour combler tous vos besoins** (environ 5 sur l'échelle de Borg).

Le nombre de répétitions

Combien de répétitions faire ? Après le paragraphe précédent, la question peut paraître bizarre. Pourtant, en regardant l'effet de la répétition d'un même ***étirement à angle constant***, il a été démontré que la majeure partie de l'effet de relâchement de la résistance à l'allongement est obtenue dans les premières répétitions (153, 157, 158, 160). Au-delà de 3 répétitions l'effet de relaxation de la force n'est plus significatif (153, 244).
Cependant, cela a été initialement observé pour des étirements à angle constant de longue durée (> à 1'). En réalité, la majorité du relâchement de la force se fait entre 30 et 45 secondes pour un étirement de 1'30. Mais ce moment est plus précoce à la 5e répétition pour un angle d'étirement donné puisqu'il apparaît à la 20e seconde. Conclusion : en répétant un étirement statique à angle constant, la durée de celui-ci pourra diminuer tout en gardant la même efficacité puisque le relâchement de force se fait plus tôt. ***La majorité des travaux penche pour un optimum à 3-4 répétitions.***
Les choses sont un peu différentes pour un étirement statique à moment constant[29]. En effet, dans cette méthode, on positionne la personne à un angle plus grand à chaque répétition en fonction du nouveau seuil de tolérance supportable obtenu. L'effet d'allongement de l'UMT[30] aura des conséquences très marquées les 5 premières secondes puis moins marquées entre 15 et 20 s et quasi nulles au-delà (222). Lors d'un protocole de 4 x 30 s[31], cet effet étant similaire pour chaque étirement de la série (même moment de plafonnement de l'allongement), on conservera la même durée de 30 s mais on pourra raccourcir à 15 s (85 % de l'effet). Concernant le nombre de répétitions, Ryan et coll. (221) ont montré qu'en répétant 4 fois ce type d'étirement sur les muscles fléchisseurs plantaires (soit 2 min de mise sous tension), ***la majorité de la diminution de la raideur se fait sur les 2 premières répétitions (près de 80 % de l'effet obtenu après 4 répétitions)*** (Figure 9).

29. Cf. p. 441 pour le protocole.

30. Cf. p. 422 pour une description.

31. Cf. partie 3 concernant les déformations musculaires et leur mesure.

Ensuite, cette décroissance se stabilise et la diminution se fait moins rapidement. Le phénomène de "creeping" ainsi que l'allongement du tendon, des fascicules, de certaines protéines élastiques du sarcomère (65, 71, 138) ou l'allongement des aponévroses intramusculaires (185) sont avancés pour expliquer cet effet, cette dernière hypothèse étant la plus probable.

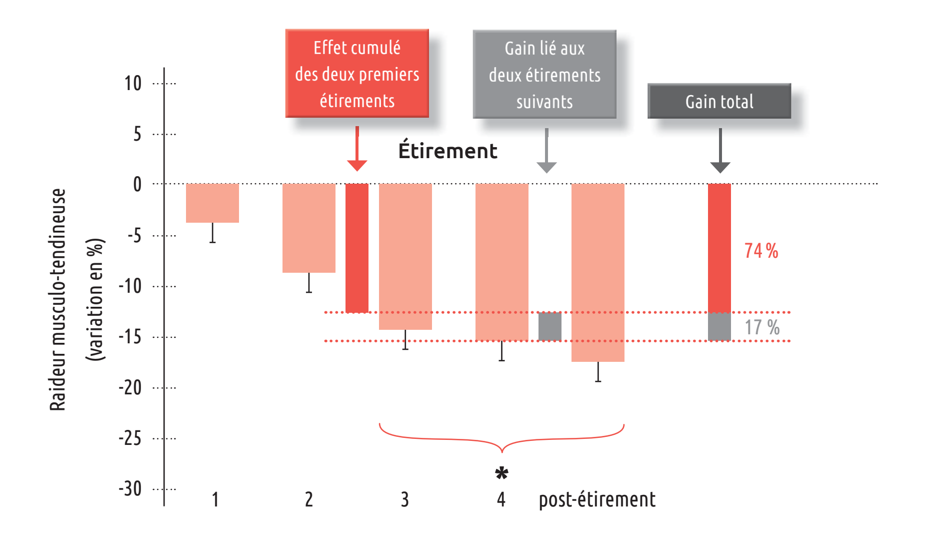


Figure 9 : Effets d'une série de 4 étirements statiques à moment constant sur la raideur musculo-tendineuse. Les gains obtenus le sont avec les 2 premiers étirements pour 80 % de l'effet total. D'après Ryan et coll. (221).

Fréquence des séances

S'étirer tous les jours entraînerait des bénéfices supérieurs à une fréquence de 1 à 3 fois dans la semaine puisque c'est la durée totale qui compte dans un premier temps au niveau sollicitation. Cependant, il semble que **3 séances suffisent pour obtenir des résultats comparés à 1 séance**. Mais, 5 séances hebdomadaires semblent apporter des bénéfices supplémentaires (165).

Une fois atteints les bénéfices souhaités en termes d'augmentation d'amplitude, doit-on maintenir une telle cadence ? C'est ce qu'ont mesuré Rancour et coll. (209) et ce, de façon aléatoire et en simple aveugle, dans le but d'éviter les biais classiques dans ce genre d'étude (les sujets étaient répartis aléatoirement entre 2 groupes : soit séance quotidienne, soit 2-3 séances hebdomadaires le tout pendant 4 semaines ; les praticiens ne savaient pas quel sujet ne faisait que 2 à 3 séances dans la semaine). **La pratique de 2 à 3 séances par semaine n'a pas entraîné de diminution d'amplitude de mouvement par rapport à celle obtenue par le groupe s'entraînant quotidiennement.**

Entraînabilité et programmation de la charge

Plus récemment, Cipriani et coll. ont organisé une large étude (62 personnes de 18 à 46 ans dont 11 dans un groupe contrôle) sur la programmation d'étirements passifs sur 4 semaines d'entraînement et 4 semaines de désentraînement pour voir comment évoluaient les paramètres de souplesse (extensibilité). Le tout était organisé en simple aveugle, c'est-à-dire que seuls les responsables de l'étude et les sujets étaient au courant de qui faisait quoi ; les autres personnes (celles faisant les mesures et celles faisant les analyses statistiques) ne savaient rien sur les participants et sur les données qui avaient été codées. La charge de travail consistait en 2 étirements de 30 s répétés dans 4 conditions différentes (protocoles) pendant les 4 premières semaines de l'expérience, les 4 suivantes étant le désentraînement :

- S14 : étirements tous les jours, 2 fois par jour (7 x 2) ;
- S7 : étirements tous les jours une seule fois par jour (7 x 1) ;
- S6 : étirements 3 fois par semaine, 2 fois par jour (3 x 2) ;
- S3 : étirements 3 fois par semaine, 1 fois par jour (3 x 1).

(S14, S7, S6 : **S6+**)

S6+ correspond aux séances incluant 6 étirements et plus par jour.

Les résultats sont illustrés par la figure ci-dessus.

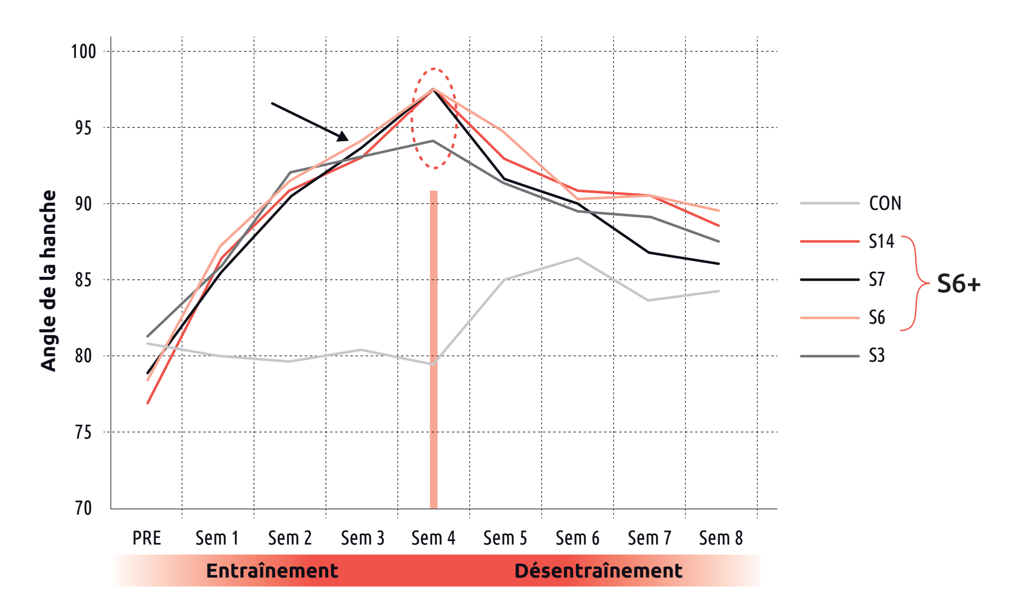


Figure 10 : 4 premières semaines de stretching (entraînement) suivies de 4 semaines de désentraînement. Le trait vertical en SEM4 indique la transition entre les 2 périodes. La flèche indique le début du plateau pour S3 en semaine 3. L'ellipse montre qu'il y a une différence entre les protocoles [S6-S7-S14] et S3, ce dernier étant légèrement moins efficace sur le long terme pour améliorer la souplesse (d'après Cipriani et coll., 2012).

La Figure 10 montre que :

- D'une part, les 4 protocoles sont équivalents pour améliorer la souplesse de hanche, avec une augmentation quasi linéaire de l'amplitude articulaire. Cependant, le S3 montre un plafonnement de sa progression dès la troisième semaine, plafonnement que l'on n'observe pas avec les autres protocoles (noté S6+). Le S3 semblerait donc "moins efficace" à long terme. **La dose optimale serait de 6 fois par semaine ou 3 fois par semaine à condition de faire 2 séances par jour, soit 6 étirements par jour minimum** ([S14=S7=S6] > S3) avec des gains respectifs +25% (S6+) vs +17% (S3) soit un bonus de 8 % après 4 semaines.

Cependant, S3 représente quand même 70 % des gains obtenus sur 4 semaines comparée aux autres modalités. Si l'on n'est pas pressé, on progressera quand même et on atteindra le même niveau qu'avec les autres protocoles mais un peu plus tard.

- D'autre part, comme toutes les qualités physiques, si on n'entraîne pas sa souplesse, elle diminue. Le rythme de diminution semble indépendant de la dose hebdomadaire utilisée (S14=S7=S6=S3) et du sexe de la personne. La diminution moyenne est de 9 % entre la quatrième et la huitième semaine. Les gains conservés par rapport aux tests pré-entraînements sont d'environ 11 % pour les groupes qui se sont entraînés.

Place dans la séance

Il existe peu d'études sur ce sujet. La seule que nous connaissons montre que, pour améliorer la souplesse en tant que qualité physique, la place de la session, avant ou après la séance d'entraînement, importe peu… du moment que l'on fait la séquence d'étirements prévue, en ce qui concerne les étirements statiques (23, 70). En revanche, le placement de la PNF dans la séance se fera en fonction de la durée des étirements programmés comme expliqué dans le paragraphe suivant.

De même, planifier une séquence d'évaluation statique ou dynamique de la souplesse n'affecte pas l'évaluation de la 1RM (22).

En revanche, le moment de la journée peut affecter l'évaluation de la souplesse compte tenu de la variation diurne de cette qualité physique (163). Il faut donc bien faire les tests au même moment de la journée si l'on souhaite comparer les résultats de 2 sessions d'évaluation (avant et après un programme).

5 • Étirements et performance

Comparer ce qui est comparable

Dans un premier temps, au début des années 2000, le focus a été mis sur les aspects négatifs des étirements, en particulier sur la force maximale, la puissance et la vitesse, par beaucoup de publications. Cela a amené certains à recommander d'abandonner cette pratique.
L'une des études les plus souvent citées pour justifier la suppression pure et simple des étirements dans la phase d'échauffement et/ou avant le corps de la séance d'entraînement est celle de Fowles et coll. (66). Attardons-nous juste un instant sur le détail de son protocole :

- il cible les fléchisseurs plantaires (mollets) ;
- il utilise des étirements d'une durée de 135 s (2 min 15s !!!) et ;
- qui sont répétés 13 fois avec 5 s de relâchement entre chaque étirement… soit ***plus de 30 min*** d'étirement sur ***un seul groupe musculaire*** !

Quid de ce type de séance d'étirements sur le terrain ? De l'aveu même de ses auteurs, *"cette expérience a simulé un étirement intense maximal au-delà de ce qu'un athlète peut tenter avant l'activité ou dans le cadre d'un programme d'entraînement de la flexibilité. […] D'autres essais, avec un protocole d'étirements plus semblable à celui régulièrement effectué dans le cadre athlétique, doivent être évalués dans les conditions contrôlées de cette étude"* (Fowles et coll. in (66)). C'est comme utiliser le "10x10" en musculation pour l'hypertrophie…

Voici pourquoi ces cinq dernières années, les études avec des protocoles plus proches de ce que les entraîneurs et les sportifs utilisent en pratique sur le terrain, se sont multipliées avec les résultats un peu différents de ceux que l'on avait jusqu'à présent sur la relation étirement-performance : à savoir un effet fonction du type d'étirements utilisé, de la durée globale de la séquence et qui n'est pas forcément délétère (53, 187, 198, 278), bien au contraire.

Une analyse des publications montre que, comme suggéré plus haut, des effets négatifs sur la performance musculaire (s'ils ont lieu) se manifestent pour une durée supérieure ou égale à 60 s pour un étirement statique, et que ce phénomène est indépendant de la tâche, du mode de contraction musculaire, ou du groupe musculaire impliqué (128).

Les étirements nuisent-ils à la performance musculaire ?

On pourrait dire que c'est le sujet qui fâche : tout et son contraire a été dit, mettant ainsi en évidence notre méconnaissance de cette relation complexe qui existe entre étirements et performance (26, 76, 218, 282, 286).
Mais la "vraie" question serait plutôt de connaître la raison d'une telle baisse de performance et si elle peut être évitée. Surtout si l'on considère les étirements comme partie intégrante de l'entraînement ou de la préparation physique. En effet, tout le monde n'a pas montré de tels effets (20, 21, 27, 58, 80, 81, 87, 131, 296). Pourquoi ?
Tout d'abord, les protocoles utilisés ont souvent été réalisés selon la vision "labo", à savoir que le protocole de stretching est tout de suite suivi de tests d'évaluation en force, puissance, vitesse ou cardio. Dans ces conditions, il a souvent été mis en avant les effets délétères des étirements sur la performance musculaire. Cependant, une analyse plus fine des protocoles a montré que non seulement la durée des étirements était souvent largement supérieure aux pratiques de terrain, mais en plus, ils étaient utilisés en dehors de toute forme d'échauffement comme cela se pratique sur le terrain.
C'est pourquoi il est important de regarder ce qui se passe lorsque l'on met en place des protocoles mimant les pratiques habituelles des sportifs pour savoir si réellement les étirements sont nocifs pour la performance ou pas. Nous parlerons ici de la durée car l'échauffement est évoqué un peu plus loin.

On peut dire qu'il est quasi démontré qu'***il existe une relation dose-effet entre la durée d'une séquence d'étirements statiques à angle ou force constante et la diminution de force maximale volontaire*** (173, 220, 222,

224). Cette relation est illustrée par la Figure 11. Cela signifie que plus l'étirement est long, plus la performance diminue… mais cela signifie aussi qu'***il y a un seuil de durée en dessous duquel un étirement n'affecte pas la performance musculaire***.

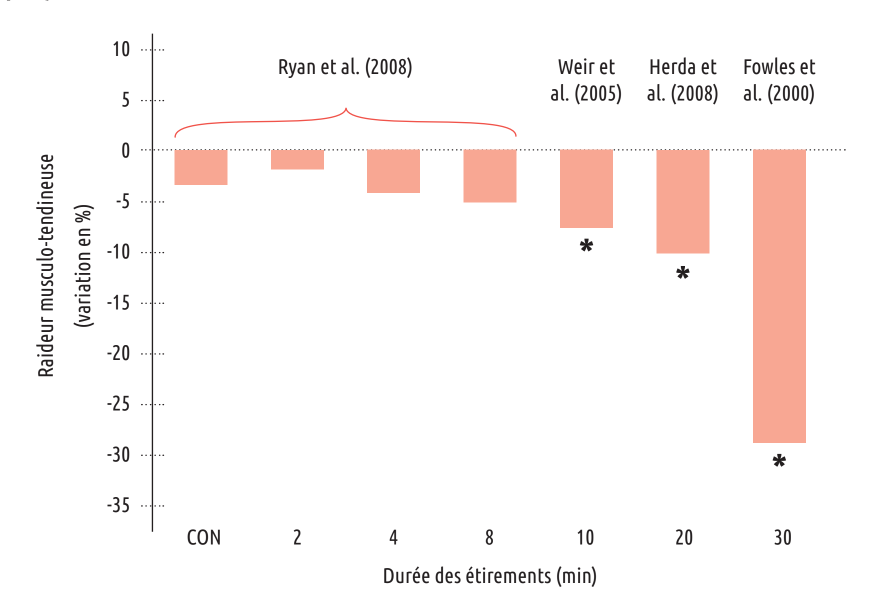


Figure 11 : Relation dose-effet entre durée totale des étirements et force maximale volontaire (d'après Ryan et coll. (220)). * : effet significatif.

Pour une ***durée totale inférieure à 2 minutes*** de sollicitation ***sur un même groupe musculaire*** sans aucune activité autre que l'étirement (comme par exemple un échauffement), on peut considérer les effets comme négligeables, et donc insuffisants pour entraîner une amélioration de la souplesse, surtout si la fréquence des séances est trop faible dans la semaine (293). Il y aurait une zone tampon (4 minutes) avec gain de souplesse et effet négatif temporaire.

Ce n'est pas la même chose pour les durées supérieures (> 4 min) : plus la séquence d'étirements est longue et plus l'impact sur les paramètres mécaniques du muscle est important, avec un maximum trouvé à ce jour dans l'étude de Fowles et coll. déjà citée (66, 220).

Qui plus est, une étude publiée en février 2013 montre clairement que ***la visco-élasticité de l'UMT revient à son état initial*** (en 15 min car ils ne l'ont pas mesuré avant comme l'ont fait d'autres auteurs (219, 220)) ***plus rapidement que ne le fait l'augmentation d'amplitude (30 min) après une séance d'étirements maintenus pendant 1 minute et répétés 5 fois, soit une durée totale de 5 minutes*** (181). Au niveau pratique, cela signifie qu'au bout de 15 min, nous sommes redevenus aussi forts et puissants tout en conservant les gains en souplesse. Une nouvelle preuve que l'on peut essayer de manipuler ces paramètres de façon indépendante selon les protocoles utilisés. Le volume d'étirements programmé dans une séance est donc un paramètre important à prendre en compte tant pour améliorer la souplesse que pour éviter un effet négatif sur les performances musculaires (166).

Donc, tant que la durée totale d'étirement est "raisonnable" (inférieure à 2 minutes), les effets sur la performance (des étirements réalisés sur un groupe musculaire) sont faibles voire inexistants surtout si ce groupe est utilisé dans une chaîne musculaire (6, 131-134, 294, 295). Si l'on a un doute, on a juste à se réserver une petite période de 5 minutes (maxi 10 minutes) après les étirements pour que tout revienne dans l'ordre et que l'on conserve malgré tout l'effet d'extensibilité. C'est l'une des explications des résultats conflictuels observés dans les protocoles utilisés à laquelle s'ajoute le niveau de pratique du sujet (9, 82, 83, 111, 215, 248, 257).

Ces résultats sont à reconsidérer à la baisse dès lors que l'on intègre les étirements dans un échauffement car les contractions musculaires occasionnées par les exercices pratiqués vont annuler les effets délétères, en totalité ou partie (126, 127, 129). Ceci a même été démontré entre autres chez des athlètes de haut niveau en escrime (254), des femmes spécialistes de course de longue distance (182), des hommes spécialistes de demi-fond et de fond (90) ou encore des rugbymen (41), confirmant ainsi des travaux antérieurs (13, 47, 55, 56, 104, 228, 257).

6 • Étirements, échauffement et prévention des blessures

Souvent les deux sont indissociables car on ne fait rarement QUE des étirements en début d'entraînement. D'où la difficulté qu'il y a eu à différencier les effets de l'un ou de l'autre dans la préparation à la performance et la prévention des blessures. Plusieurs questions ont émané des premiers travaux sur les étirements et leur intérêt dans la préparation à la performance, notamment lorsque l'on a évoqué de façon (un peu trop) systématique les travaux de Fowles et coll. comme argument contre leur utilisation avant la séance durant l'échauffement.

Dissocier effets immédiats et chroniques

Les effets souvent évoqués comme délétères l'étaient parce que non inclus dans un échauffement. Soyons un peu pragmatique et interrogeons-nous : qui s'étire plus de 30 s sur un groupe musculaire juste avant de faire une performance maximale sans s'échauffer ? Par ailleurs, qu'en est-il des effets immédiats et chroniques d'un entraînement de souplesse ? Les réponses à ces questions sont simples. Par exemple, il est démontré que **les étirements statiques faits régulièrement ont un effet positif sur la performance,** surtout s'ils sont intégrés à l'échauffement (135, 190), sans pour autant influencer d'autres variables comme l'économie sous-maximale de course (90, 191, 300) ni d'autres paramètres musculaires (cf. 5 • pour les références).
Les effets sur le long terme sont de plus en plus documentés. **Leur intégration dans la programmation pour obtenir des bénéfices au niveau de la performance est justifiée voire recommandée sous certaines conditions** (95, 96, 135, 191, 218, 223, 243).

Une programmation réaliste et utile

Le niveau de performance musculaire que l'on est capable de produire n'est pas affecté lorsque l'on se place dans des conditions classiquement utilisées sur le terrain (34). C'est notamment le cas lorsque l'on les fait pré-

céder et suivre d'un exercice de sollicitation de type aérobie et/ou d'exercices plus explosifs (189). Certes, l'incorporation d'étirements statiques est bénéfique pour la performance musculaire en général, mais **on peut cibler de façon plus spécifique la puissance avec la méthode dynamique** (avec des étirements dynamiques et balistiques) (45, 117, 164, 182, 186, 218, 239, 255, 256, 287, 289). **Même les étirements de type PNF peuvent être bénéfiques pour l'expression des facteurs neuromusculaires tant en souplesse qu'en saut** (200, 205).
Abordons le cas particulier des pratiques gymniques ou de sports de combat par exemple, dans lesquelles le niveau d'amplitude est tel que le simple fait de se mettre en écart ne représente aucune contrainte particulière même sans échauffement musculaire préalable. L'entraînement régulier modifie de façon durable les paramètres comme l'extensibilité musculaire jusqu'au seuil de douleur supportable ou le niveau d'activité des fuseaux neuromusculaires en réponse à un stress lié à une amplitude d'ouverture importante d'une articulation (82, 83). L'arrêt de l'entraînement en souplesse étant réversible, ces paramètres reviennent à leur valeur pré-entraînement de façon plus ou moins rapide selon la méthode utilisée (49, 80, 81).

Prévenir les blessures musculo-tendineuses

Là aussi des résultats contradictoires ont été obtenus, générant un climat de suspicion concernant la pratique des étirements en vue de prévenir les blessures d'une façon générale. Et c'est justement là le problème : "en général" ne veut pas dire "de façon spécifique". L'erreur souvent faite dans les publications qui essaient de faire le lien entre stretching et blessures, c'est que tout est mélangé. Il s'agit donc de voir quel lien existe entre la pratique régulière des étirements et les **blessures musculo-tendineuses**… et non pas osseuses ou ligamentaires, ou encore celles liées à un traumatisme ou un surentraînement (mauvaise gestion de la charge d'entraînement).
C'est pourquoi nous allons résumer ici la plupart des études qui ont tenté de répondre à cette question. Elles ont apporté **les premières preuves en faveur d'une pratique régulière des étirements sur les blessures musculo-tendineuses** (7, 76, 118, 140, 172-175, 237, 240, 274, 281-283, 286).

Un peu de mécanique

Mais avant, nous devons faire un petit crochet par la fameuse relation tension-longueur (ou moment-angle) qui décrit le comportement mécanique actif (contractile) et passif (élastique) du muscle. La tension totale qu'un muscle peut produire n'est pas liée qu'à son tissu contractile. Le tissu élastique (conjonctif) joue un rôle d'autant plus important que les ponts d'acto-myosine formés sont peu nombreux (figure 12).

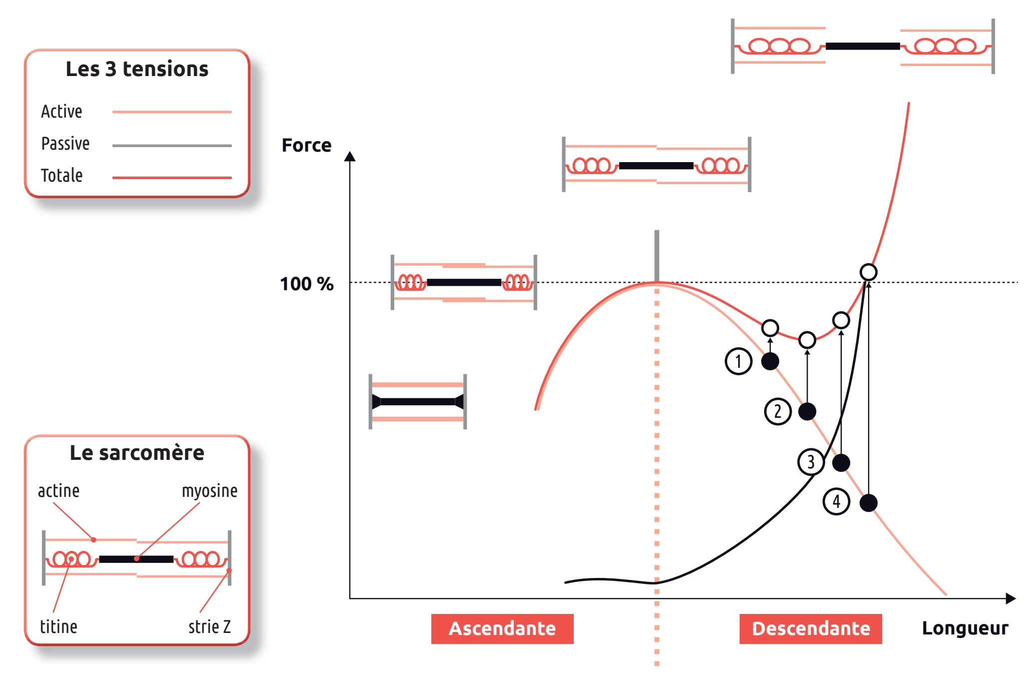


Figure 12 : La courbe théorique tension-longueur d'une fibre musculaire. Il existe autant de courbes tension-longueur que de types de muscle dans l'organisme. Voir description dans le texte.

Mise en tension d'un muscle actif

Lors de la mise en tension d'un muscle actif, deux tensions s'ajoutent comme le montre la courbe rouge représentant la ***tension totale*** que le muscle est capable de produire. La ***tension active*** (courbe rose) est liée aux ponts entre les

myofilaments d'actine et de myosine. La ***tension passive*** (courbe noire) est liée à la quantité, la qualité et la répartition du tissu conjonctif dans le muscle, paramètres qui changent avec la fonction du muscle. Un muscle "tonique" (mouvement lent) comme le m. soleus est plus riche en tissu conjonctif qu'un muscle "phasique" (mouvement rapide) comme le m. rectus femoris. Il en résulte qu'à longueur et force équivalentes, le m. soleus produit une tension passive deux fois plus élevée que celle du m. rectus femoris (136). Ainsi, la stimulation d'un muscle pendant qu'il est allongé entraîne une production de tension totale plus élevée (4 positions marquées d'un cercle vide dans la figure 12 où l'on ajoute la tension passive du tissu conjonctif) qu'avec la tension générée par les ***pontages entre myofilaments*** (4 positions marquées d'un cercle plein sans implication du tissu conjonctif). Les travaux de Herzog et coll. ont exploré de façon intensive ces phénomènes (plus de 60 publications). Ils démontrent que, lors d'une contraction excentrique, la longueur du sarcomère reste quasiment égale à celle d'une contraction isométrique grâce à la présence de la titine et de sa raideur variable en fonction de la concentration de calcium au sein de la fibre musculaire (4, 63, 99-101, 120, 121, 211).
Ce phénomène n'est possible que grâce à la compliance du tendon et des fascias. La contrainte se concentre donc sur les structures élastiques au sein de la fibre musculaire… jusqu'à une certaine limite au-delà de laquelle on crée de plus en plus de microlésions au niveau des molécules attachant les fibres musculaires entre elles, des stries Z et même dans le sarcomère. Le travail excentrique (dans la partie descendante de la courbe de tension active) est donc plus productif que le travail concentrique (courbe ascendante de la courbe de tension active) en termes de tension totale mais plus délétère pour l'intégrité de la myofibrille.

Mise en tension d'un muscle passif

Lors de la mise en tension d'un muscle passif, la résistance à l'allongement est en grande partie le fait de la résistance de la titine comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe précédent. S'ajoutent néanmoins celles des fascias comme l'ont démontré de nombreuses expériences de biologie moléculaire ou d'autres réalisés à l'aide des imageries musculaires à ultrasons.

Les ponts d’actine-myosine ne vont pas s’opposer autant qu’ils ne le font en contraction. La charge de travail qui en résulte se reporte presque exclusivement sur le tissu conjonctif au sein du muscle car l’étirement va rapidement diminuer la viscosité du tendon (augmentation d’extensibilité) sans changer son élasticité (137). On remarquera d’ailleurs que cette courbe noire de la figure 12 est de même forme que celle de la Figure 4 dans la phase initiale de mise sous tension du muscle.

Et les bobos ?

C’est bien beau tout ça… mais quel est le lien avec les blessures tendinomusculaires ? Nous l’avons évoqué à l’instant : la charge de travail imposée au tissu conjonctif est d’autant plus importante que le muscle est allongé. L’hypothèse selon laquelle la raideur musculaire serait un facteur intrinsèque augmentant la probabilité d’apparition des blessures a été évoquée et étudiée à plusieurs reprises (72, 76, 193, 226, 236, 258, 259, 288). Il s’agirait d’un problème d’extensibilité : un muscle "raide" étant moins extensible qu’un muscle "souple", il sollicite plus rapidement le tissu conjonctif. On observe la même chose chez l'homme, comparé à la femme, puisque l’on sait qu'elle a généralement des muscles moins charnus, donc contenant moins de tissu conjonctif, donc plus extensibles (28, 49). On peut dire la même chose concernant la maturation ou le vieillissement (61, 194, 195, 197).
La comparaison des effets des étirements statiques et balistiques sur le muscle fait déjà sauter une idée reçue selon laquelle les seconds causeraient des dommages musculaires et les premiers non. C’est l’inverse qui est montré ou bien une absence de dommages selon le protocole utilisé (24, 142, 241). Une première explication sur cette absence de dommages en étirement balistique et une présence de dommages en étirement statique serait que la méthode dynamique déclenche le réflexe myotatique et entraîne une contraction musculaire, donc une tension active qui vient s’ajouter à la tension passive imposée au tissu conjonctif. La contrainte est ainsi supportée par les deux tissus et non un seul comme dans l’étirement statique. Ce qui est illustré par la relation tension-longueur.

Si l'on continue sur notre lancée, nous pouvons évoquer les douleurs musculaires qui suivent une grosse séance de renforcement musculaire par exemple, appelées courbatures (ou DOMS, "Delayed Onset Muscle Soreness" pour les Anglo-saxons).
À l'aide d'un instrument permettant de faire un étirement jambe tendue, McHugh et coll. (172) ont réparti des sujets en trois groupes selon leur souplesse des ischio-jambiers. Les plus raides avaient une raideur passive supérieure de 78 % à celle des personnes aux muscles compliants.
Ils ont mis en évidence une plus grande sensibilité à l'allongement des personnes raides comparées à celles qui avaient une extensibilité moyenne ou élevée. Ils ont apporté ainsi la preuve expérimentale d'une association entre la souplesse et les blessures musculaires, notamment entre la souplesse statique et les facteurs de risque liés aux symptômes les plus graves de lésions musculaires après l'exercice excentrique.
Dans la même lignée, Witvrouw et coll. (280), en utilisant la même méthode de McHugh et coll. mais de façon manuelle, ont mis en évidence le lien entre la diminution de souplesse des ischio-jambiers (angle inférieur à 90°) et des quadriceps et la prévalence des blessures sur ces mêmes muscles durant un suivi de 2 ans chez des footballeurs professionnels (Figure 13). Une nouvelle fois, une moins bonne extensibilité porte préjudice à l'intégrité des muscles des membres inférieurs. Cette relation n'est pas forcément vraie pour tous les muscles.

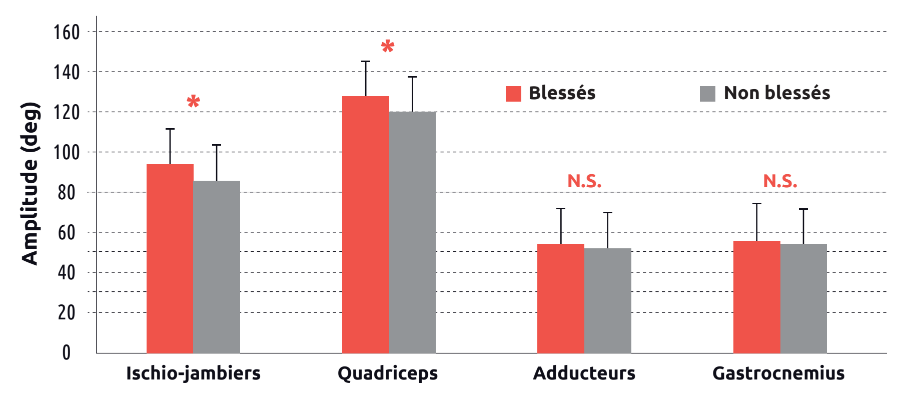


Figure 13 : Comparaison de la souplesse des joueurs blessés et non blessés sur les 4 groupes musculaires des membres inférieurs. D'après Witvrouw et coll. (263).
*** : significatif ; NS : non significatif.**

Alonso et coll. (5) ont mesuré de façon isométrique la courbe moment-angle des muscles ischio-jambiers et illustré la différence qui existe entre personnes raides et "normales" au niveau de ces muscles (figure 14).

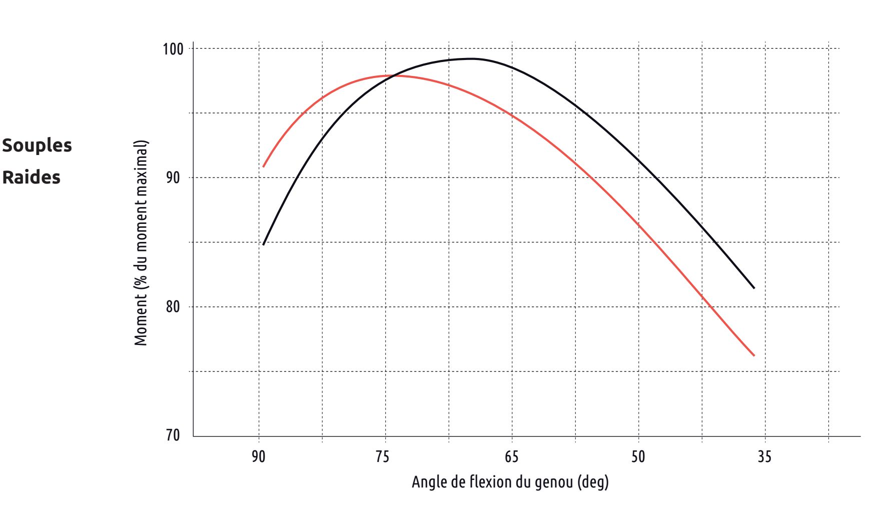


Figure 14 : Différence de courbe tension-longueur chez des sujets raides et normaux au niveau des muscles ischio-jambiers.
La raideur maximale est la même en valeur relative (pourcentage), mais les personnes "raides" commencent à solliciter leur tissu conjonctif sur la branche descendante à un angle plus précoce que les personnes "normales". D'après Alonso et coll.(5).

Ces résultats corroborent ceux d'autres travaux (36, 37, 119, 176, 272, 285) qui mettent en évidence le même décalage vers la droite de la courbe tension-longueur (moment-angle) suite à un entraînement de type excentrique ou un entraînement de souplesse. Cela signifie que l'on sollicite les mêmes structures et/ou que l'on provoque les mêmes effets. De plus, ce décalage vers la droite a un effet préventif sur les blessures musculaires. En mettant moins rapidement de contraintes sur le tissu conjonctif de façon préférentielle, on limite les microlésions ou les lésions. Pour preuve, la Figure 15 montre le décalage de la même courbe vers la droite suite à un entraînement de type excentrique. L'entraînement excentrique a donc les mêmes effets que l'entraînement en souplesse au niveau mécanique.

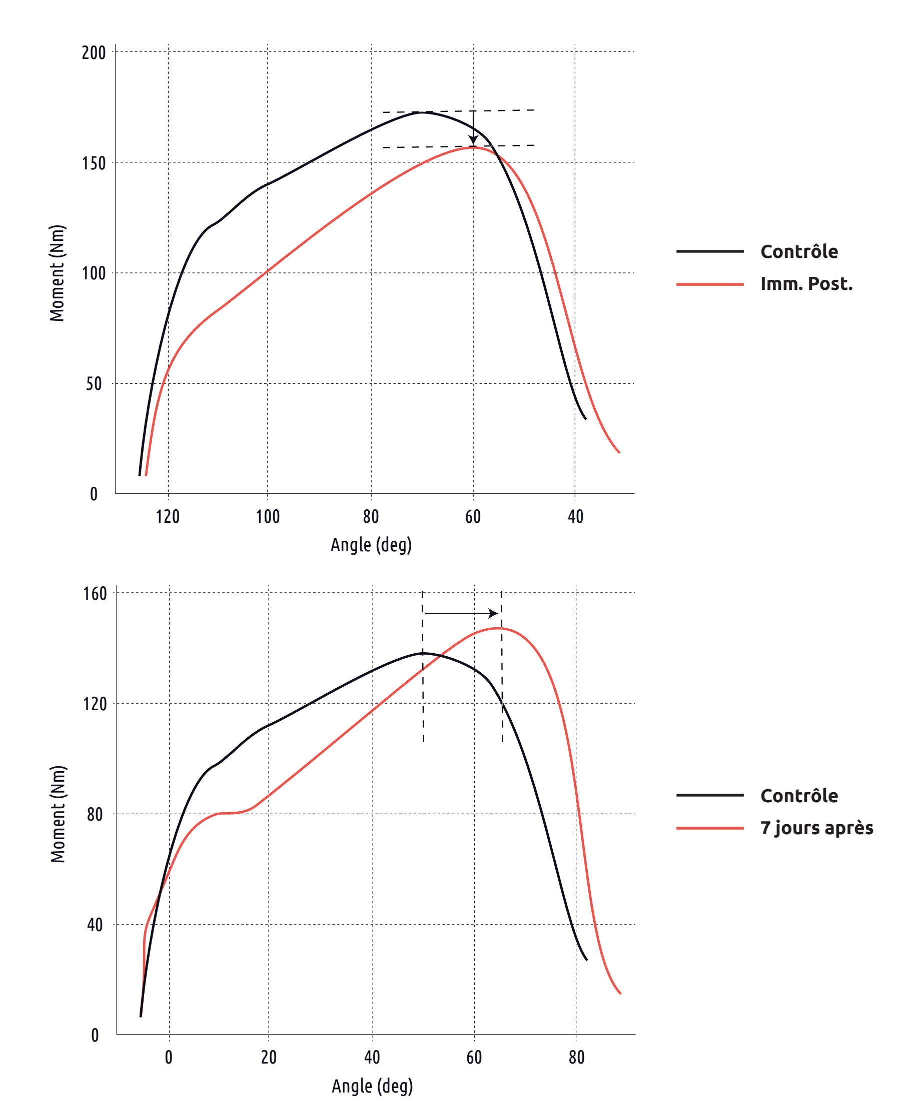


Figure 15 : Changement de longueur optimale des muscles ischio-jambiers suite à un entraînement excentrique.
La courbe rouge montre que, immédiatement après l'exercice (Imm. Post), il y a diminution de la force maximale et décalage vers la droite de l'angle optimal. Sept jours après la séance, la longueur est la même mais la force a augmenté. D'après Brockett et coll., (36).

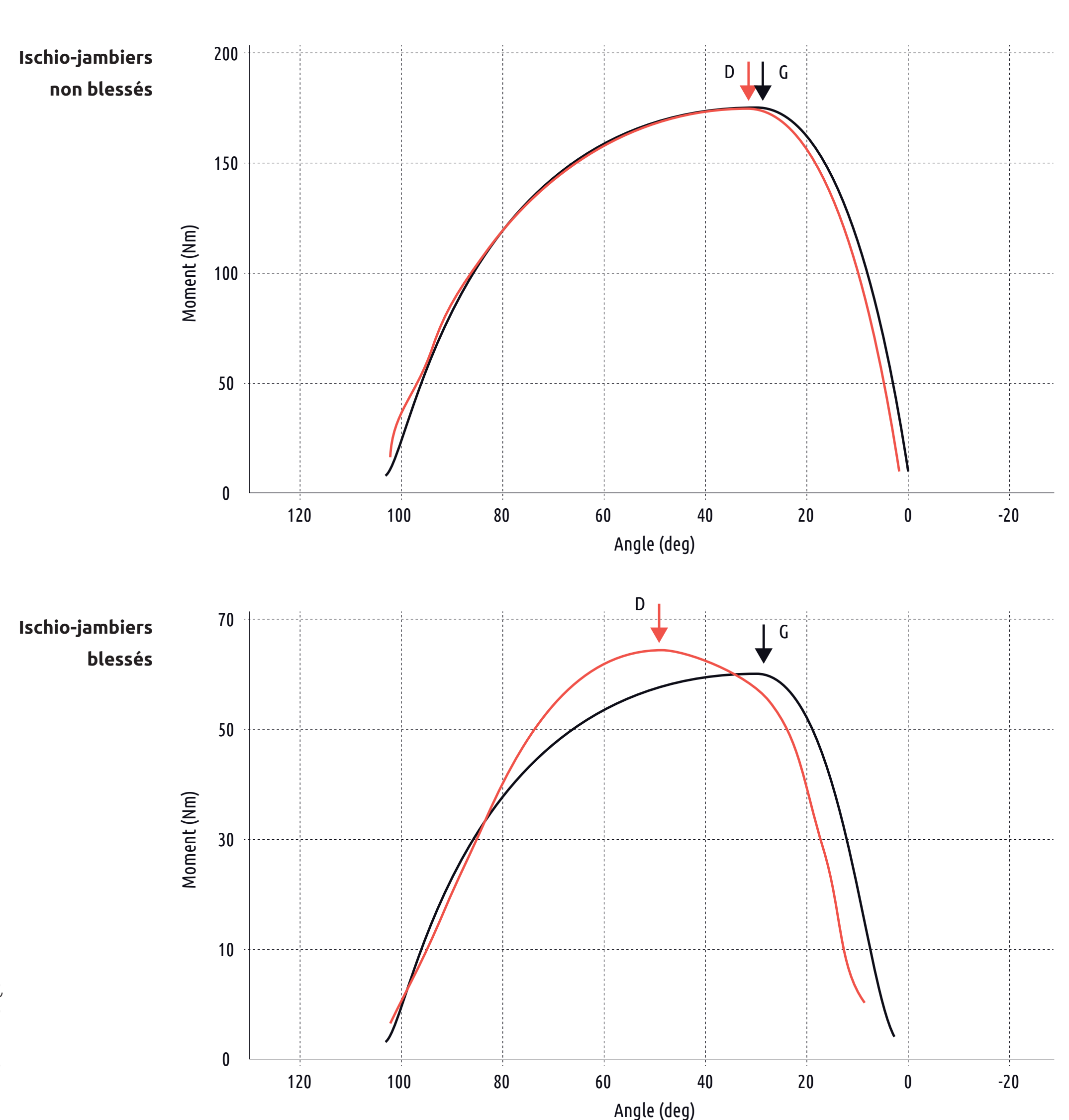


Figure 16 : Comparaison des courbes tension-longueur de 2 personnes avec les muscles ischio-jambiers non blessés (cuisse gauche, G) et blessés (cuisse droite, D). Le sujet ayant les ischio-jambiers blessés montre une différence très nette entre les courbes des deux membres inférieurs : la courbe se décale vers la gauche. D'après Brockett et coll. (37).

Enfin, la comparaison des muscles ischio-jambiers chez des sujets blessés et non blessés vient apporter la preuve que les muscles plus raides ou moins extensibles produisent leur force maximale à un angle plus précoce et bascule sur la branche descendante de la courbe (travail excentrique) plus précocement. En d'autres termes, ceux qui ont une longueur optimale plus faible sont plus susceptibles de se blesser et de rechuter car ils ne retrouvent pas le même niveau d'extensibilité que celui qui n'est pas blessé. C'est ce qu'illustre la figure 16.
Mis ensemble, ces résultats soulignent **l'importance des phases d'entraînement préparatoire en excentrique pour bien encaisser les charges de travail imposées par ce type de contraction, et les phases d'amélioration ou d'entretien de l'extensibilité pour prévenir les blessures musculo-tendineuses** par une optimisation des paramètres mécaniques du muscle (notamment la relation tension-longueur ou moment-angle).

Le coin des bizarreries

Pour finir, nous parlerons de quelques effets aussi atypiques qu'intéressants dans les méthodes d'entraînement de la souplesse et leurs effets collatéraux. Nous ne ferons que les évoquer car il y a très peu de publications sur ces sujets même s'ils sont très prometteurs pour certains.

Influences neurovégétatives

Deux études ont récemment démontré l'impact des pratiques de stretching sur la variabilité de la fréquence cardiaque et la diminution de douleurs en général, justifiant une nouvelle fois leur intégration dans les phases de récupération (188, 243). Cependant, cet effet n'a été démontré pour l'instant que chez des personnes "raides". Les résultats sur des personnes "souples" sont attendus.

Effet controlatéral

Pour démontrer une nouvelle fois l'implication des mécanismes nerveux dans les méthodes d'amélioration de la souplesse, une étude de 2012 a montré que le stretching PNF permettait d'augmenter non seulement la souplesse et la force du muscle étiré, mais aussi de façon indirecte la force musculaire du muscle controlatéral. Étonnant, non ? (192). Le protocole : 4 x 30 s d'étirement statique, séparés de 30 s de repos, répétés 3 fois par semaine pendant 10 semaines.
Voici donc une autre façon d'utiliser les étirements en les intégrant dans l'entraînement pendant les phases d'arrêt suite à une blessure par exemple, pour limiter l'atrophie musculaire des membres ayant un traumatisme et conserver un minimum d'extensibilité.

Étirement à froid

Parlons maintenant des étirements "à froid". Par "à froid", il faut comprendre en dehors de la séance d'entraînement. Il s'agit ici de faire une séance de souplesse sans échauffement préalable, en travaillant de façon globale (chaîne) ou locale (ciblée sur un groupe musculaire).

Avant de préciser pourquoi cette méthode est intéressante, il est important de rappeler que, même en pensant travailler de façon ciblée sur un groupe musculaire, on mobilise d'autres structures périphériques par l'intermédiaire des fascias de façon active ou passive selon la méthode utilisée. Il est donc impossible d'isoler un muscle à proprement parler. Partant de là, imaginez que le matin au réveil, disons vers 7h30, vous vous mettiez au bord de votre lit et que vous vous penchiez en avant, jambes légèrement fléchies pour éviter de trop tirer derrière le genou votre muscle poplité. Vous essayez d'atteindre vos orteils en douceur et sans à-coups… le tout en respectant votre seuil de douleur tolérable. L'angle que vous allez faire au niveau de la hanche et du tronc par rapport aux cuisses sera plus faible à ce moment-là de la journée que le soir vers 18 h (163). Cela signifie que vous avez mis en tension les structures myotendineuses beaucoup

plus tôt. Dit autrement, vous avez atteint votre angle optimal ou votre seuil de douleur beaucoup plus tôt.

Si l'on considère que l'un des principaux facteurs d'amélioration de la souplesse est le recul du seuil de douleur, alors voici une méthode de sollicitation parfaitement adaptée à vos besoins. Vous n'aurez pas à faire de grande amplitude angulaire pour solliciter votre seuil de douleur et ainsi l'améliorer. Pour l'avoir utilisé à maintes reprises avec des personnes souvent très raides et tout autant avec des gymnastes de tous âges, nous pouvons la considérer comme efficiente et sans danger si l'on respecte les consignes données ci-dessus. Qui plus est, les gains, notamment sur les muscles adducteurs et ischio-jambiers pour ce type de sport, sont très significatifs. Les durées de maintien peuvent dans ce cas dépasser les 30 secondes. On peut évidemment la coupler aux autres méthodes que l'on placerait dans la séance (début ou fin) selon les besoins.

Application de froid

Pour finir, évoquons simplement que l'application de froid sur le muscle ne change rien au niveau des résultats d'un programme d'étirements statiques (210) alors que la chaleur externe (non liée à une contraction musculaire) a un effet sur l'extensibilité, mais la durée nécessaire à cette pratique étant élevée (au moins 20 min), elle n'est guère utile sur le terrain.

7 • Explications des effets des méthodes de souplesse

Mécaniques, nerveux ou sensoriels ?

La première chose a été d'évoquer une diminution de la résistance à l'allongement pour expliquer les progrès obtenus en souplesse. Mais, en faisant un programme de 3 semaines d'étirement statique sur une seule jambe et en la comparant à l'autre non sollicitée, Magnusson et coll. (159) ont montré que les deux jambes avaient la même raideur alors que ***le seuil de douleur reculait avec l'entraînement*** et avancé cette hypothèse comme explication potentielle des étirements puisque les caractéristiques mécaniques étudiées n'avaient pas changé ; hypothèse que d'autres ont évoquée (85, 142, 161) et mise en avant comme seule explication plausible de l'amélioration de la souplesse. Cependant, d'autres résultats ont démontré que les effets des étirements étaient aussi bien mécaniques (152, 153, 157, 160) que nerveux (25, 81, 83, 84), ou les deux à la fois (8, 26, 54, 66, 156), sans pour autant que les réponses soient encore définitives (51, 94). L'effet transitoire de tous ces phénomènes en rend complexe son interprétation.

Et la méthode dans tout ça ?

Nous n'allons pas nous attarder sur ce point car beaucoup de travaux récents sont actuellement publiés sur ce thème et il faut prendre un peu de recul pour essayer d'avoir une vision plus précise de ce qui se passe. Avec la méthode passive, il a été avancé qu'un allongement de la longueur des fibres musculaires pourrait expliquer l'augmentation de l'angle articulaire avec l'entraînement. Pour autant, cela n'a jamais été démontré… dans ces conditions en tout cas (214). Par contre, une altération de la relation force-longueur du muscle est tout à fait possible (143) mais elle ne se fera pas de la même façon selon la technique utilisée : l'étirement à angle constant aurait peu (ou pas) d'effet sur cette relation contrairement à l'étirement à force constante (92).

Récemment, une équipe a comparé l'effet des étirements statiques passifs aux effets obtenus par la vibration musculaire sur la fonction neuromusculaire des muscles fléchisseurs plantaires car ils produisent les mêmes diminutions de force lorsque l'on les utilise de façon prolongée (93, 94). La conclusion des auteurs est que les deux formes de sollicitation provoquent une altération des mécanismes nerveux de façon similaire, mais pas pour ce qui concerne les paramètres mécaniques pouvant expliquer les chutes de performance. Cela prouve une nouvelle fois que les étirements affectent le comportement mécanique du muscle.



Mayron Reiss à 3 ans.
Travail sur la souplesse commencé dès l'âge de six mois, âge permettant un début de travail, le petit étant "réactif". Toujours sous forme de jeu, faire tous les jours des étirements de 5 à 10 secondes en statique et dynamique ; deux à trois étirements.

8 • Conclusion

Nous avons été surpris par l'essor qu'a pris la thématique "stretching" au niveau des publications. C'est l'un des parents pauvres de la préparation physique. Beaucoup lui accordent plus ou moins d'importance en fonction de leur spécialité sportive. L'accélération des travaux dans ce domaine est de bon augure car ils vont nous permettre d'affiner notre connaissance de ce qui se passe dans le muscle en utilisant les différentes méthodes citées précédemment.

Nous avons tenté ici de brosser un panorama des connaissances actuelles qui sont de toute façon amenées à évoluer pour notre plus grand plaisir. Cela implique que nous pourrons encore mieux optimiser nos programmations, obtenir de façon soit plus rapide, soit plus efficace (ou les deux…) les résultats désirés, prévenir l'apparition de certaines blessures musculaires (ce qui ne veut pas dire les faire disparaître car le risque zéro n'existe pas).

Selon notre expérience, si l'on souhaite vraiment améliorer rapidement la souplesse d'un(e) sportif(ve), il est plus intéressant :

- de faire dans un premier temps un bilan musculaire, une analyse posturale et une analyse des besoins et ;
- de partir de ces éléments pour planifier des séquences spécifiques (par exemple une séance d'une heure UNIQUEMENT de souplesse) pour ensuite revenir aux techniques, phases de mouvement, que l'on souhaite améliorer en combinant stretching et musculation.

C'est de cette façon que nous avons obtenu nos meilleurs résultats.

Bibliographie

• 1 • Agarkova I, Ehler E, Lange S, Schoenauer R, and Perriard JC. M-band: a safeguard for sarcomere stability? Journal of muscle research and cell motility 24: 191-203, 2003.

• 2 • Agarkova I and Perriard JC. The M-band: an elastic web that crosslinks thick filaments in the center of the sarcomere. Trends in cell biology 15: 477-485, 2005.

• 3 • Agarkova I, Schoenauer R, Ehler E, Carlsson L, Carlsson E, Thornell LE, and Perriard JC. The molecular composition of the sarcomeric M-band correlates with muscle fiber type. European journal of cell biology 83: 193-204, 2004.

• 4 • Allinger TL, Epstein M, and Herzog W. Stability of muscle fibers on the descending limb of the force-length relation. A theoretical consideration. J Biomech 29: 627-633, 1996.

• 5 • Alonso J, McHugh MP, Mullaney MJ, and Tyler TF. Effect of hamstring flexibility on isometric knee flexion angle-torque relationship. Scand J Med Sci Sports 19: 252-256, 2008.

• 6 • Alpkaya U and Koceja D. The effects of acute static stretching on reaction time and force. J Sports Med Phys Fitness 47: 147-150, 2007.

• 7 • Amtmann J. Stretch your routine: athletes aren't the only ones to benefit from flexibility. JEMS : a journal of emergency medical services 34: 36, 38, 2009.

• 8 • Avela J, Finni T, Liikavainio T, Niemela E, and Komi PV. Neural and mechanical responses of the triceps surae muscle group after 1 h of repeated fast passive stretches. J Appl Physiol 96: 2325-2332, 2004.

• 9 • Avela J and Komi PV. Reduced stretch reflex sensitivity and muscle stiffness after long-lasting stretch-shortening cycle exercise in humans. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 78: 403-410, 1998.

• 10 • Ayala F and Sainz de Baranda Andújar P. Effect of 3 Different Active Stretch Durations on Hip Flexion Range of Motion. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 430-436, 2010.

• 11 • Azizi E, Brainerd EL, and Roberts TJ. Variable gearing in pennate muscles. Proc Natl Acad Sci U S A 105: 1745-1750, 2008.

• 12 • Azizi E and Roberts TJ. Biaxial strain and variable stiffness in aponeuroses. J Physiol 587: 4309-4318, 2009.

• 13 • Bacurau RFP, Monteiro GA, Ugrinowitsch C, Tricoli V, Cabral LF, and Aoki MS. Acute Effect of a Ballistic and a Static Stretching Exercise Bout on Flexibility and Maximal Strength. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 304-308, 2009.

• 14 • Badylak SF. The extracellular matrix as a scaffold for tissue reconstruction. Seminars in cell & developmental biology 13: 377-383, 2002.

• 15 • Badylak SF, Freytes DO, and Gilbert TW. Extracellular matrix as a biological scaffold material: Structure and function. Acta biomaterialia 5: 1-13, 2009.

• 16 • Bandy WD and Irion JM. The Effect of Time on Static Stretch on the Flexibility of the Hamstring Muscles. Physical therapy 74: 845-850, 1994.

• 17 • Bandy WD, Irion JM, and Briggler M. The Effect of Time and Frequency of Static Stretching on Flexibility of the Hamstring Muscles. Physical therapy 77: 1090-1096, 1997.

• 18 • Bandy WD, Irion JM, and Briggler M. The effect of static stretch and dynamic range of motion training on the flexibility of the hamstring muscles. J Orthop Sports Phys Ther 27: 295-300, 1998.

• 19 • Bang ML, Caremani M, Brunello E, Littlefield R, Lieber RL, Chen J, Lombardi V, and Linari M. Nebulin plays a direct role in promoting strong actin-myosin interactions. FASEB journal : official publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology 23: 4117-4125, 2009.

• 20 • Bazett-Jones DM, Gibson MH, and McBride JM. Sprint and Vertical Jump Performances Are Not Affected by Six Weeks of Static Hamstring Stretching. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 25-31, 2008.

• 21 • Bazett-Jones DM, Winchester JB, and McBride JM. Effect of Potentiation and Stretching on Maximal Force,Rate of Force Development, and Range of Motion. The Journal of Strength & Conditioning Research 19: 421-426, 2005.

• 22 • Beedle B, Rytter SJ, Healy RC, and Ward TR. Pretesting Static and Dynamic Stretching Does Not Affect Maximal Strength. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 1838-1843, 2008.

• 23 • Beedle BB, Leydig SN, and Carnucci JM. No Difference in Pre- and Postexercise Stretching on Flexibility. The Journal of Strength & Conditioning Research 21: 780-783, 2007.

• 24 • Beedle BB and Mann CL. A comparison of two warm-ups on joint range of motion. J Strength Cond Res 21: 776-779, 2007.

• 25 • Behm DG, Button DC, and Butt JC. Factors affecting force loss with prolonged stretching. Can J Appl Physiol 26: 261-272, 2001.

• 26 • Behm DG and Chaouachi A. A review of the acute effects of static and dynamic stretching on performance. Eur J Appl Physiol 111: 2633-2651, 2011.

• 27 • Benn C, Forman K, Mathewson D, Tapply M, Tiskus S, Whang K, and Blanpied P. The effects of serial stretch loading on stretch work and stretch-shorten cycle performance in the knee musculature. J Orthop Sports Phys Ther 27: 412-422, 1998.

• 28 • Blackburn JT, Bell DR, Norcross MF, Hudson JD, and Engstrom LA. Comparison of hamstring neuromechanical properties between healthy males and females and the influence of musculotendinous stiffness. J Electromyogr Kinesiol 19: e362-369, 2009.

• 29 • Bloch RJ and Gonzalez-Serratos H. Lateral Force Transmission Across Costameres in Skeletal Muscle. Exercise and sport sciences reviews 31: 73-78, 2003.

• 30 • Bojsen-Moller J, Hansen P, Aagaard P, Kjaer M, and Magnusson SP. Measuring mechanical properties of the vastus lateralis tendon-aponeurosis complex in vivo by ultrasound imaging. Scand J Med Sci Sports 13: 259-265, 2003.

• 31 • Bojsen-Moller J, Hansen P, Aagaard P, Svantesson U, Kjaer M, and Magnusson SP. Differential displacement of the human soleus and medial gastrocnemius aponeuroses during isometric plantar flexor contractions in vivo. J Appl Physiol 97: 1908-1914, 2004.

• 32 • Bojsen-Moller J, Schwartz S, Kalliokoski KK, Finni T, and Magnusson SP. Intermuscular force transmission between human plantarflexor muscles in vivo. J Appl Physiol 109: 1608-1618, 2010.

• 33 • Bonnar BP, Deivert RG, and Gould TE. The relationship between isometric contraction durations during hold-relax stretching and improvement of hamstring flexibility. J Sports Med Phys Fitness 44: 258-261, 2004.

• 34 • Brandenburg JP. Duration of stretch does not influence the degree of force loss following static stretching. J Sports Med Phys Fitness 46: 526-534, 2006.

• 35 • Bressel E and McNair PJ. The effect of prolonged static and cyclic stretching on ankle joint stiffness, torque relaxation, and gait in people with stroke. Physical therapy 82: 880-887, 2002.

• 36 • Brockett CL, Morgan DL, and Proske U. Human hamstring muscles adapt to eccentric exercise by changing optimum length. Med Sci Sports Exerc 33: 783-790, 2001.

• 37 • Brockett CL, Morgan DL, and Proske U. Predicting hamstring strain injury in elite athletes. Med Sci Sports Exerc 36: 379-387, 2004.

• 38 • Brunello E, Fusi L, Reconditi M, Linari M, Bianco P, Panine P, Narayanan T, Piazzesi G, Lombardi V, and Irving M. Structural changes in myosin motors and filaments during relaxation of skeletal muscle. J Physiol 587: 4509-4521, 2009.

• 39 • Brunello E, Reconditi M, Elangovan R, Linari M, Sun YB, Narayanan T, Panine P, Piazzesi G, Irving M, and Lombardi V. Skeletal muscle resists stretch by rapid binding of the second motor domain of myosin to actin. Proc Natl Acad Sci U S A 104: 20114-20119, 2007.

• 40 • Burke DG, Holt LE, Rasmussen R, MacKinnon NC, Vossen JF, and Pelham TW. Effects of Hot or Cold Water Immersion and Modified Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Flexibility Exercise on Hamstring Length. J Athl Train 36: 16-19, 2001.

• 41 • Caplan N, Rogers R, Parr MK, and Hayes PR. The Effect of Proprioceptive Neuromuscular Facilitation and Static Stretch Training on Running Mechanics. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 1175-1180, 2009.

• 42 • Castillo A, Nowak R, Littlefield KP, Fowler VM, and Littlefield RS. A nebulin ruler does not dictate thin filament lengths. Biophysical journal 96: 1856-1865, 2009.

• 43 • Chalmers GR. Do Golgi tendon organs really inhibit muscle activity at high force levels to save muscles from injury, and adapt with strength training? Sports Biomech 1: 239-249, 2002.

• 44 • Chalmers GR. Re-examination of the possible role of Golgi tendon organ and muscle spindle reflexes in proprioceptive neuromuscular facilitation muscle stretching. Sports Biomech 3: 159-183, 2004.

• 45 • Chaouachi A, Castagna C, Chtara M, Brughelli M, Turki O, Galy O, Chamari K, and Behm DG. Effect of warm-ups involving static or dynamic stretching on agility, sprinting, and jumping performance in trained individuals. Journal of strength and conditioning research / National Strength & Conditioning Association 24: 2001-2011, 2010.

• 46 • Chen MJ, Shih CL, and Wang K. Nebulin as an actin zipper. A two-module nebulin fragment promotes actin nucleation and stabilizes actin filaments. The Journal of biological chemistry 268: 20327-20334, 1993.

• 47 • Christensen BK and Nordstrom BJ. The Effects of Proprioceptive Neuromuscular Facilitation and Dynamic Stretching Techniques on Vertical Jump Performance. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 1826-1831, 2008.

• 48 • Cipriani D, Abel B, and Pirrwitz D. A comparison of two stretching protocols on hip range of motion: implications for total daily stretch duration. J Strength Cond Res 17: 274-278, 2003.

• 49 • Cipriani DJ, Terry ME, Haines MA, Tabibnia AP, and Lyssanova O. Effect of Stretch Frequency and Sex on the Rate of Gain and Rate of Loss in Muscle Flexibility During a Hamstring-Stretching Program: A Randomized Single-Blind Longitudinal Study. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 2119-2129, 2012.

• 50 • Cornelius WL and Rauschuber MR. The Relationship Between Isometric Contraction Durations and Improvement in Acute Hip Joint Flexibility. The Journal of Strength & Conditioning Research 1: 39-41, 1987.

• 51 • Cornwell A, Nelson AG, and Sidaway B. Acute effects of stretching on the neuromechanical properties of the triceps surae muscle complex. Eur J Appl Physiol 86: 428-434, 2002.

• 52 • Costa ML, Escaleira R, Cataldo A, Oliveira F, and Mermelstein CS. Desmin: molecular interactions and putative functions of the muscle intermediate filament protein. Brazilian journal of medical and biological research = Revista brasileira de pesquisas medicas e biologicas / Sociedade Brasileira de Biofisica [et al] 37: 1819-1830, 2004.

• 53 • Cramer JT, Housh TJ, Johnson GO, Weir JP, Beck TW, and Coburn JW. An acute bout of static stretching does not affect maximal eccentric isokinetic peak torque, the joint angle at peak torque, mean power, electromyography, or mechanomyography. J Orthop Sports Phys Ther 37: 130-139, 2007.

• 54 • Cramer JT, Housh TJ, Weir JP, Johnson GO, Coburn JW, and Beck TW. The acute effects of static stretching on peak torque, mean power output, electromyography, and mechanomyography. Eur J Appl Physiol 93: 530-539, 2005.

• 55 • Dalrymple KJ, Davis SE, Dwyer GB, and Moir GL. Effect of Static and Dynamic Stretching on Vertical Jump Performance in Collegiate Women Volleyball Players. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 149-155, 2010.

• 56 • Egan AD, Cramer JT, Massey LL, and Marek SM. Acute Effects of Static Stretching on Peak Torque and Mean Power Output in National Collegiate Athletic Association Division I Women's Basketball Players. The Journal of Strength & Conditioning Research 20: 778-782, 2006.

• 57 • Etnyre BR and Abraham LD. Gains in range of ankle dorsiflexion using three popular stretching techniques. American journal of physical medicine 65: 189-196, 1986.

• 58 • Evetovich TK, Nauman NJ, Conley DS, and Todd JB. Effect of static stretching of the biceps brachii on torque, electromyography, and mechanomyography during concentric isokinetic muscle actions. J Strength Cond Res 17: 484-488, 2003.

• 59 • Feland JB and Marin HN. Effect of submaximal contraction intensity in contract-relax proprioceptive neuromuscular facilitation stretching. Br J Sports Med 38: E18, 2004.

• 60 • Ferber R, Hreljac A, and Kendall KD. Suspected Mechanisms in the Cause of Overuse Running Injuries: A Clinical Review. Sports Health: A Multidisciplinary Approach 1: 242-246, 2009.

• 61 • Ferber R, Osternig L, and Gravelle D. Effect of PNF stretch techniques on knee flexor muscle EMG activity in older adults. J Electromyogr Kinesiol 12: 391-397, 2002.

• 62 • Fetz EE, Perlmutter SI, Prut Y, Seki K, and Votaw S. Roles of primate spinal interneurons in preparation and execution of voluntary hand movement. Brain research Brain research reviews 40: 53-65, 2002.

• 63 • Forcinito M, Epstein M, and Herzog W. Theoretical considerations on myofibril stiffness. Biophysical journal 72: 1278-1286, 1997.

• 64 • Ford GM, Margaret A. ; Taylor, Keith ;. The Effect of 4 Different Durations of Static Hamstring Stretching on Passive Knee-Extension Range of Motion in Healthy Subjects. Journal of sport rehabilitation 14: 95-107, 2005.

• 65 • Fowles JR, MacDougall JD, Tarnopolsky MA, Sale DG, Roy BD, and Yarasheski KE. The effects of acute passive stretch on muscle protein synthesis in humans. Can J Appl Physiol 25: 165-180, 2000.

• 66 • Fowles JR, Sale DG, and MacDougall JD. Reduced strength after passive stretch of the human plantarflexors. J Appl Physiol 89: 1179-1188, 2000.

• 67 • Fujita H, Labeit D, Gerull B, Labeit S, and Granzier HL. Titin isoform-dependent effect of calcium on passive myocardial tension. American journal of physiology Heart and circulatory physiology 287: H2528-2534, 2004.

• 68 • Fukunaga T, Kawakami Y, Kubo K, and Kanehisa H. Muscle and Tendon Interaction During Human Movements. Exercise and sport sciences reviews 30: 106-110, 2002.

• 69 • Fukushima H, Chung CS, and Granzier H. Titin-isoform dependence of titin-actin interaction and its regulation by S100A1/Ca2+ in skinned myocardium. Journal of biomedicine & biotechnology 2010: 727239, 2010.

• 70 • Funk DC, Swank AM, Mikla BM, Fagan TA, and Farr BK. Impact of prior exercise on hamstring flexibility: a comparison of proprioceptive neuromuscular facilitation and static stretching. J Strength Cond Res 17: 489-492, 2003.

• 71 • Gajdosik RL, Vander Linden DW, McNair PJ, Williams AK, and Riggin TJ. Effects of an eight-week stretching program on the passive-elastic properties and function of the calf muscles of older women. Clin Biomech (Bristol, Avon) 20: 973-983, 2005.

• 72 • Garrett WE, Jr. Muscle strain injuries. Am J Sports Med 24: S2-8, 1996.

• 73 • Gibala MJ, Interisano SA, Tarnopolsky MA, Roy BD, MacDonald JR, Yarasheski KE, and MacDougall JD. Myofibrillar disruption following acute concentric and eccentric resistance exercise in strength-trained men. Canadian journal of physiology and pharmacology 78: 656-661, 2000.

• 74 • Gibala MJ, MacDougall JD, Tarnopolsky MA, Stauber WT, and Elorriaga A. Changes in human skeletal muscle ultrastructure and force production after acute resistance exercise. J Appl Physiol 78: 702-708, 1995.

• 75 • Gillies AR and Lieber RL. Structure and function of the skeletal muscle extracellular matrix. Muscle & nerve 44: 318-331, 2011.

• 76 • Gleim GW and McHugh MP. Flexibility and its effects on sports injury and performance. Sports Med 24: 289-299, 1997.

• 77 • Granzier H, Helmes M, Cazorla O, McNabb M, Labeit D, Wu Y, Yamasaki R, Redkar A, Kellermayer M, Labeit S, and Trombitas K. Mechanical properties of titin isoforms. Adv Exp Med Biol 481: 283-300; discussion 300-284, 2000.

• 78 • Granzier H and Labeit S. Structure-function relations of the giant elastic protein titin in striated and smooth muscle cells. Muscle & nerve 36: 740-755, 2007.

• 79 • Granzier HL and Labeit S. The Giant Muscle Protein Titin is an Adjustable Molecular Spring. Exercise and sport sciences reviews 34: 50-53, 2006.

• 80 • Guissard N and Duchateau J. Effect of static stretch training on neural and mechanical properties of the human plantar-flexor muscles. Muscle & nerve 29: 248-255, 2004.

• 81 • Guissard N and Duchateau J. Neural Aspects of Muscle Stretching. Exercise and sport sciences reviews 34: 154-158, 2006.

• 82 • Guissard N, Duchateau J, de Montigny L, and Hainaut K. Decrease of motoneuron excitability during stretching of the human soleus. Biomedica biochimica acta 48: S489-492, 1989.

• 83 • Guissard N, Duchateau J, and Hainaut K. Muscle stretching and motoneuron excitability. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 58: 47-52, 1988.

• 84 • Guissard N, Duchateau J, and Hainaut K. Mechanisms of decreased motoneurone excitation during passive muscle stretching. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 137: 163-169, 2001.

• 85 • Halbertsma JP and Goeken LN. Stretching exercises: effect on passive extensibility and stiffness in short hamstrings of healthy subjects. Archives of physical medicine and rehabilitation 75: 976-981, 1994.

• 86 • Han DG. The other mechanism of muscular referred pain: the «connective tissue» theory. Med Hypotheses 73: 292-295, 2009.

• 87 • Handel M, Horstmann T, Dickhuth HH, and Gulch RW. Effects of contract-relax stretching training on muscle performance in athletes. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 76: 400-408, 1997.

• 88 • Hardy LJ, David;. Dynamic Flexibility and Proprioceptive Neuromuscular Facilitation. Research Quarterly for Exercise and Sport 57: 150-153, 1986.

• 89 • Hartley-O'Brien S. Six mobilization exercises for active range of hip flexion. Res Q Exerc Sport 51: 625-635, 1980.

• 90 • Hayes PR and Walker A. Pre-Exercise Stretching Does Not Impact Upon Running Economy. The Journal of Strength & Conditioning Research 21: 1227-1232, 2007.

• 91 • Herda TJ, Costa PB, Walter AA, Ryan ED, and Cramer JT. The time course of the effects of constant-angle and constant-torque stretching on the muscle-tendon unit. Scand J Med Sci Sports, 2012.

• 92 • Herda TJ, Herda ND, Costa PB, Walter-Herda AA, Valdez AM, and Cramer JT. The effects of dynamic stretching on the passive properties of the muscle-tendon unit. J Sports Sci, 2012.

• 93 • Herda TJ, Ryan ED, Costa PB, Walter AA, Hoge KM, Uribe BP, McLagan JR, Stout JR, and Cramer JT. Acute effects of passive stretching and vibration on the electromechanical delay and musculotendinous stiffness of the plantar flexors. Electromyogr Clin Neurophysiol 50: 277-288, 2010.

• 94 • Herda TJ, Ryan ED, Smith AE, Walter AA, Bemben MG, Stout JR, and Cramer JT. Acute effects of passive stretching vs vibration on the neuromuscular function of the plantar flexors. Scand J Med Sci Sports 19: 703-713, 2009.

• 95 • Herman K, Barton C, Malliaras P, and Morrissey D. The effectiveness of neuromuscular warm-up strategies, that require no additional equipment, for preventing lower limb injuries during sports participation: a systematic review. BMC medicine 10: 75, 2012.

• 96 • Herman SL and Smith DT. Four-week dynamic stretching warm-up intervention elicits longer-term performance benefits. J Strength Cond Res 22: 1286-1297, 2008.

• 97 • Herzog JA, Leonard TR, Jinha A, and Herzog W. Are titin properties reflected in single myofibrils? J Biomech 45: 1893-1899, 2012.

• 98 • Herzog W, Duvall M, and Leonard TR. Molecular mechanisms of muscle force regulation: a role for titin? Exerc Sport Sci Rev 40: 50-57, 2012.

• 99 • Herzog W, Lee EJ, and Rassier DE. Residual force enhancement in skeletal muscle. J Physiol 574: 635-642, 2006.

• 100 • Herzog W, Leonard T, Joumaa V, DuVall M, and Panchangam A. The three filament model of skeletal muscle stability and force production. Mol Cell Biomech 9: 175-191, 2012.

• 101 • Herzog W and Leonard TR. Force enhancement following stretching of skeletal muscle: a new mechanism. J Exp Biol 205: 1275-1283, 2002.

• 102 • Hidalgo C and Granzier H. Tuning the molecular giant titin through phosphorylation: Role in health and disease. Trends in cardiovascular medicine, 2013.

• 103 • Hidalgo CG, Chung CS, Saripalli C, Methawasin M, Hutchinson KR, Tsaprailis G, Labeit S, Mattiazzi A, and Granzier HL. The multifunctional Ca(2+)/calmodulin-dependent protein kinase II delta (CaMKIIdelta) phosphorylates cardiac titin's spring elements. J Mol Cell Cardiol 54: 90-97, 2013.

• 104 • Higgs F and Winter SL. The Effect of a Four-Week Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Stretching Program on Isokinetic Torque Production. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 1442-1447, 2009.

• 105 • Holt JH, L. E.; Pelham, T. W.;. Flexibility redefined, in: Biomechanics in Sports. T Bauer, ed. Thunder Bay, Ontario: Lakehead University, 1996, pp 170-174.

• 106 • Horowits R. Passive force generation and titin isoforms in mammalian skeletal muscle. Biophysical journal 61: 392-398, 1992.

• 107 • Horowits R, Kempner ES, Bisher ME, and Podolsky RJ. A physiological role for titin and nebulin in skeletal muscle. Nature 323: 160-164, 1986.

• 108 • Horowits R, Maruyama K, and Podolsky RJ. Elastic behavior of connectin filaments during thick filament movement in activated skeletal muscle. The Journal of cell biology 109: 2169-2176, 1989.

• 109 • Horowits R and Podolsky RJ. The positional stability of thick filaments in activated skeletal muscle depends on sarcomere length: evidence for the role of titin filaments. The Journal of cell biology 105: 2217-2223, 1987.

• 110 • Hortobagyi T, Houmard J, Fraser D, Dudek R, Lambert J, and Tracy J. Normal forces and myofibrillar disruption after repeated eccentric exercise. J Appl Physiol 84: 492-498, 1998.

• 111 • Hough PA, Ross EZ, and Howatson G. Effects of Dynamic and Static Stretching on Vertical Jump Performance and Electromyographic Activity. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 507-512, 2009.

• 112 • Huijing PA. Muscular Force Transmission Necessitates a Multilevel Integrative Approach to the Analysis of Function of Skeletal Muscle. Exercise and sport sciences reviews 31: 167-175, 2003.

• 113 • Huijing PA and Baan GC. Myofascial force transmission: muscle relative position and length determine agonist and synergist muscle force. J Appl Physiol 94: 1092-1107, 2003.

• 114 • Ishikawa M and Komi PV. The role of the stretch reflex in the gastrocnemius muscle during human locomotion at various speeds. J Appl Physiol 103: 1030-1036, 2007.

• 115 • Ishikawa M, Komi PV, Grey MJ, Lepola V, and Bruggemann GP. Muscle-tendon interaction and elastic energy usage in human walking. J Appl Physiol 99: 603-608, 2005.

• 116 • Ishikawa M, Pakaslahti J, and Komi PV. Medial gastrocnemius muscle behavior during human running and walking. Gait & posture 25: 380-384, 2007.

• 117 • Jaggers JR, Swank AM, Frost KL, and Lee CD. The Acute Effects of Dynamic and Ballistic Stretching on Vertical Jump Height, Force, and Power. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 1844-1849, 2008.

• 118 • Jamtvedt G, Herbert RD, Flottorp S, Odgaard-Jensen J, Havelsrud K, Barratt A, Mathieu E, Burls A, and Oxman AD. A pragmatic randomised trial of stretching before and after physical activity to prevent injury and soreness. Br J Sports Med 44: 1002-1009, 2010.

• 119 • Jones C, Allen T, Talbot J, Morgan DL, and Proske U. Changes in the mechanical properties of human and amphibian muscle after eccentric exercise. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 76: 21-31, 1997.

• 120 • Joumaa V, Macintosh BR, and Herzog W. New insights into force depression in skeletal muscle. J Exp Biol 215: 2135-2140, 2012.

• 121 • Joumaa V, Rassier DE, Leonard TR, and Herzog W. The origin of passive force enhancement in skeletal muscle. American journal of physiology Cell physiology 294: 10, 2008.

• 122 • Kabat H and Knott M. Principles of neuromuscular reeducation. The Physical therapy review 28: 107-111, 1948.

• 123 • Kabat H and Knott M. Proprioceptive facilitation technics for treatment of paralysis. The Physical therapy review 33: 53-64, 1953.

• 124 • Kawakami Y and Fukunaga T. New Insights into In Vivo Human Skeletal Muscle Function. Exercise and sport sciences reviews 34: 16-21, 2006.

• 125 • Kawakami Y, Muraoka T, Ito S, Kanehisa H, and Fukunaga T. In vivo muscle fibre behaviour during counter-movement exercise in humans reveals a significant role for tendon elasticity. J Physiol 540: 635-646, 2002.

• 126 • Kay AD and Blazevich AJ. Isometric contractions reduce plantar flexor moment, Achilles tendon stiffness, and neuromuscular activity but remove the subsequent effects of stretch. J Appl Physiol 107: 1181-1189, 2009.

• 127 • Kay AD and Blazevich AJ. Concentric muscle contractions before static stretching minimize, but do not remove, stretch-induced force deficits. J Appl Physiol 108: 637-645, 2010.

• 128 • Kay AD and Blazevich AJ. Effect of acute static stretch on maximal muscle performance: a systematic review. Med Sci Sports Exerc 44: 154-164, 2012.

• 129 • Kay D, Marino FE, Cannon J, St Clair Gibson A, Lambert MI, and Noakes TD. Evidence for neuromuscular fatigue during high-intensity cycling in warm, humid conditions. Eur J Appl Physiol 84: 115-121, 2001.

• 130 • Kjaer M. The secrets of matrix mechanical loading. Scand J Med Sci Sports 19: 455-456, 2009.

• 131 • Knudson D, Bennett K, Corn R, Leick D, and Smith C. Acute Effects of Stretching Are Not Evident in the Kinematics of the Vertical Jump. The Journal of Strength & Conditioning Research 15: 98-101, 2001.

• 132 • Knudson D and Noffal G. Time course of stretch-induced isometric strength deficits. European journal of applied physiology 94: 348-351, 2005.

• 133 • Knudson DV, Noffal GJ, Bahamonde RE, Bauer JA, and Blackwell JR. Stretching Has No Effect on Tennis Serve Performance. The Journal of Strength & Conditioning Research 18: 654-656, 2004.

• 134 • Koch AJ, O'Bryant HS, Stone ME, Sanborn K, Proulx C, Hruby J, Shannonhouse E, Boros R, and Stone MH. Effect of Warm-Up on the Standing Broad Jump in Trained and Untrained Men and Women. The Journal of Strength & Conditioning Research 17: 710-714, 2003.

• 135 • Kokkonen J, Nelson AG, Eldredge C, and Winchester JB. Chronic static stretching improves exercise performance. Medicine and science in sports and exercise 39: 1825-1831, 2007.

• 136 • Kovanen V, Suominen H, and Heikkinen E. Mechanical properties of fast and slow skeletal muscle with special reference to collagen and endurance training. J Biomech 17: 725-735, 1984.

• 137 • Kubo K, Kanehisa H, and Fukunaga T. Effect of stretching training on the viscoelastic properties of human tendon structures in vivo. J Appl Physiol 92: 595-601, 2002.

• 138 • Kubo K, Kanehisa H, Kawakami Y, and Fukunaga T. Influence of static stretching on viscoelastic properties of human tendon structures in vivo. J Appl Physiol 90: 520-527, 2001.

• 139 • Labeit D, Watanabe K, Witt C, Fujita H, Wu Y, Lahmers S, Funck T, Labeit S, and Granzier H. Calcium-dependent molecular spring elements in the giant protein titin. Proc Natl Acad Sci U S A 100: 13716-13721, 2003.

• 140 • LaBella CR, Huxford MR, Grissom J, Kim KY, Peng J, and Christoffel KK. Effect of neuromuscular warm-up on injuries in female soccer and basketball athletes in urban public high schools: cluster randomized controlled trial. Archives of pediatrics & adolescent medicine 165: 1033-1040, 2011.

• 141 • Lange S, Ehler E, and Gautel M. From A to Z and back? Multicompartment proteins in the sarcomere. Trends in cell biology 16: 11-18, 2006.

• 142 • LaRoche DP and Connolly DA. Effects of stretching on passive muscle tension and response to eccentric exercise. Am J Sports Med 34: 1000-1007, 2006.

• 143 • LaRoche DP, Lussier MV, and Roy SJ. Chronic stretching and voluntary muscle force. J Strength Cond Res 22: 589-596, 2008.

• 144 • Lichtwark GA and Wilson AM. Interactions between the human gastrocnemius muscle and the Achilles tendon during incline, level and decline locomotion. J Exp Biol 209: 4379-4388, 2006.

• 145 • Linke WA. Sense and stretchability: the role of titin and titin-associated proteins in myocardial stress-sensing and mechanical dysfunction. Cardiovascular research 77: 637-648, 2008.

• 146 • Liversage AD, Holmes D, Knight PJ, Tskhovrebova L, and Trinick J. Titin and the sarcomere symmetry paradox. Journal of molecular biology 305: 401-409, 2001.

• 147 • Maas H, Baan GC, and Huijing PA. Muscle force is determined also by muscle relative position: isolated effects. J Biomech 37: 99-110, 2004.

• 148 • Maas H and Huijing PA. Myofascial force transmission in dynamic muscle conditions: effects of dynamic shortening of a single head of multi-tendoned rat extensor digitorum longus muscle. Eur J Appl Physiol 94: 584-592, 2005.

• 149 • Maas H and Huijing PA. Synergistic and antagonistic interactions in the rat forelimb: acute effects of coactivation. J Appl Physiol 107: 1453-1462, 2009.

• 150 • Maas H and Sandercock TG. Force transmission between synergistic skeletal muscles through connective tissue linkages. Journal of biomedicine & biotechnology 2010: 575672, 2010.

• 151 • Maganaris CN and Paul JP. In vivo human tendon mechanical properties. J Physiol 521 Pt 1: 307-313, 1999.

• 152 • Magnusson SP. Passive properties of human skeletal muscle during stretch maneuvers. A review. Scand J Med Sci Sports 8: 65-77, 1998.

• 153 • Magnusson SP, Aagard P, Simonsen E, and Bojsen-Moller F. A biomechanical evaluation of cyclic and static stretch in human skeletal muscle. Int J Sports Med 19: 310-316, 1998.

• 154 • Magnusson SP, Hansen P, Aagaard P, Brond J, Dyhre-Poulsen P, Bojsen-Moller J, and Kjaer M. Differential strain patterns of the human gastrocnemius aponeurosis and free tendon, in vivo. Acta Physiol Scand 177: 185-195, 2003.

• 155 • Magnusson SP, Narici MV, Maganaris CN, and Kjaer M. Human tendon behaviour and adaptation, in vivo. J Physiol 586: 71-81, 2008.

• 156 • Magnusson SP, Simonsen EB, Aagaard P, Boesen J, Johannsen F, and Kjaer M. Determinants of musculoskeletal flexibility: viscoelastic properties, cross-sectional area, EMG and stretch tolerance. Scand J Med Sci Sports 7: 195-202, 1997.

• 157 • Magnusson SP, Simonsen EB, Aagaard P, Gleim GW, McHugh MP, and Kjaer M. Viscoelastic response to repeated static stretching in the human hamstring muscle. Scand J Med Sci Sports 5: 342-347, 1995.

• 158 • Magnusson SP, Simonsen EB, Aagaard P, and Kjaer M. Biomechanical responses to repeated stretches in human hamstring muscle in vivo. Am J Sports Med 24: 622-628, 1996.

• 159 • Magnusson SP, Simonsen EB, Aagaard P, Sorensen H, and Kjaer M. A mechanism for altered flexibility in human skeletal muscle. J Physiol 497 (Pt 1): 291-298, 1996.

• 160 • Magnusson SP, Simonsen EB, Dyhre-Poulsen P, Aagaard P, Mohr T, and Kjaer M. Viscoelastic stress relaxation during static stretch in human skeletal muscle in the absence of EMG activity. Scand J Med Sci Sports 6: 323-328, 1996.

• 161 • Mahieu NN, Cools A, De Wilde B, Boon M, and Witvrouw E. Effect of proprioceptive neuromuscular facilitation stretching on the plantar flexor muscle-tendon tissue properties. Scand J Med Sci Sports 19: 553-560, 2009.

• 162 • Mahieu NN, McNair P, De Muynck M, Stevens V, Blanckaert I, Smits N, and Witvrouw E. Effect of static and ballistic stretching on the muscle-tendon tissue properties. Med Sci Sports Exerc 39: 494-501, 2007.

• 163 • Manire JT, Kipp R, Spencer J, and Swank AM. Diurnal Variation of Hamstring and Lumbar Flexibility. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 1464-1471, 2010.

• 164 • Manoel ME, Harris-Love MO, Danoff JV, and Miller TA. Acute effects of static, dynamic, and proprioceptive neuromuscular facilitation stretching on muscle power in women. Journal of strength and conditioning research / National Strength & Conditioning Association 22: 1528-1534, 2008.

• 165 • Marques AP, Vasconcelos AA, Cabral CM, and Sacco IC. Effect of frequency of static stretching on flexibility, hamstring tightness and electromyographic activity. Brazilian journal of medical and biological research = Revista brasileira de pesquisas medicas e biologicas / Sociedade Brasileira de Biofisica [et al] 42: 949-953, 2009.

• 166 • Marshall PWM, Cashman A, and Cheema BS. A randomized controlled trial for the effect of passive stretching on measures of hamstring extensibility, passive stiffness, strength, and stretch tolerance. Journal of science and medicine in sport / Sports Medicine Australia 14: 535-540, 2011.

• 167 • Maruyama K. Connectin, an elastic protein from myofibrils. Journal of biochemistry 80: 405-407, 1976.

• 168 • Maruyama K, Matsubara S, Natori R, Nonomura Y, and Kimura S. Connectin, an elastic protein of muscle. Characterization and Function. Journal of biochemistry 82: 317-337, 1977.

• 169 • Maruyama M, Feinberg JR, Capello WN, and D'Antonio JA. Morphologic Features of the Acetabulum and Femur: Anteversion Angle and Implant Positioning. Clinical orthopaedics and related research 393: 52-65, 2001.

• 170 • Matsubara S and Maruyama K. Role of connectin in the length-tension relation of skeletal and cardiac muscles. The Japanese journal of physiology 27: 589-600, 1977.

• 171 • McAtee REC, J. Facilitated stretching: assisted and unassisted PNF stretching made easy. Champaign (IL): Human Kinetics, 1999.

• 172 • McHugh MP, Connolly DA, Eston RG, Kremenic IJ, Nicholas SJ, and Gleim GW. The role of passive muscle stiffness in symptoms of exercise-induced muscle damage. Am J Sports Med 27: 594-599, 1999.

• 173 • McHugh MP and Cosgrave CH. To stretch or not to stretch: the role of stretching in injury prevention and performance. Scand J Med Sci Sports 20: 169-181, 2010.

• 174 • McHugh MP and Nesse M. Effect of stretching on strength loss and pain after eccentric exercise. Med Sci Sports Exerc 40: 566-573, 2008.

• 175 • McHugh MP and Pasiakos S. The role of exercising muscle length in the protective adaptation to a single bout of eccentric exercise. Eur J Appl Physiol 93: 286-293, 2004.

• 176 • McHugh MP and Tetro DT. Changes in the relationship between joint angle and torque production associated with the repeated bout effect. J Sports Sci 21: 927-932, 2003.

• 177 • Mitchell UH, Myrer JW, Hopkins JT, Hunter I, Feland JB, and Hilton SC. Acute stretch perception alteration contributes to the success of the PNF «contract-relax» stretch. Journal of sport rehabilitation 16: 85-92, 2007.

• 178 • Mitchell UH, Myrer JW, Hopkins JT, Hunter I, Feland JB, and Hilton SC. Neurophysiological reflex mechanisms' lack of contribution to the success of PNF stretches. Journal of sport rehabilitation 18: 343-357, 2009.

• 179 • Mitchell WK, Baker MR, and Baker SN. Muscle responses to transcranial stimulation in man depend on background oscillatory activity. J Physiol 583: 567-579, 2007.

• 180 • Mitsuhashi K, Seki K, Akamatsu C, and Handa Y. Modulation of excitability in the cerebral cortex projecting to upper extremity muscles by rotational positioning of the forearm. The Tohoku journal of experimental medicine 212: 221-228, 2007.

• 181 • Mizuno T, Matsumoto M, and Umemura Y. Viscoelasticity of the muscle–tendon unit is returned more rapidly than range of motion after stretching. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports 23: 23-30, 2013.

• 182 • Mojock CD, Kim J-S, Eccles DW, and Panton LB. The Effects of Static Stretching on Running Economy and Endurance Performance in Female Distance Runners During Treadmill Running. The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 2170-2176, 2011.

• 183 • Monroy JA, Lappin AK, and Nishikawa KC. Elastic Properties of Active Muscle-On the Rebound? Exercise and sport sciences reviews 35: 174-179, 2007.

• 184 • Monroy JA, Powers KL, Gilmore LA, Uyeno TA, Lindstedt SL, and Nishikawa KC. What Is the Role of Titin in Active Muscle? Exercise and sport sciences reviews 40: 73-78, 2012.

• 185 • Morse CI, Degens H, Seynnes OR, Maganaris CN, and Jones DA. The acute effect of stretching on the passive stiffness of the human gastrocnemius muscle tendon unit. J Physiol 586: 97-106, 2008.

• 186 • Morton SK, Whitehead JR, Brinkert RH, and Caine DJ. Resistance Training vs. Static Stretching: Effects on Flexibility and Strength. The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 3391-3398, 2011.

• 187 • Moss WR, Feland JB, Hunter I, and Hopkins JT. Static stretching does not alter pre and post-landing muscle activation. Sports medicine, arthroscopy, rehabilitation, therapy & technology : SMARTT 3: 9, 2011.

• 188 • Mueck-Weymann M, Janshoff G, and Mueck H. Stretching increases heart rate variability in healthy athletes complaining about limited muscular flexibility. Clinical autonomic research : official journal of the Clinical Autonomic Research Society 14: 15-18, 2004.

• 189 • Murphy JR, Di Santo MC, Alkanani T, and Behm DG. Aerobic activity before and following short-duration static stretching improves range of motion and performance vs. a traditional warm-up. Appl Physiol Nutr Metab 35: 679-690, 2010.

• 190 • Myer GD, Faigenbaum AD, Chu DA, Falkel J, Ford KR, Best TM, and Hewett TE. Integrative training for children and adolescents: techniques and practices for reducing sports-related injuries and enhancing athletic performance. Phys Sportsmed 39: 74-84, 2011.

• 191 • Nelson AG, Kokkonen J, Eldredge C, Cornwell A, and Glickman-Weiss E. Chronic stretching and running economy. Scand J Med Sci Sports 11: 260-265, 2001.

• 192 • Nelson AG, Kokkonen J, Winchester JB, Kalani W, Peterson K, Kenly MS, and Arnall DA. A 10-Week Stretching Program Increases Strength in the Contralateral Muscle. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 832-836, 2012.

• 193 • Noonan TJ and Garrett WE, Jr. Muscle strain injury: diagnosis and treatment. The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons 7: 262-269, 1999.

• 194 • O'Brien TD, Reeves ND, Baltzopoulos V, Jones DA, and Maganaris CN. Mechanical properties of the patellar tendon in adults and children. J Biomech 43: 1190-1195, 2010.

• 195 • O'Brien TD, Reeves ND, Baltzopoulos V, Jones DA, and Maganaris CN. Muscle-tendon structure and dimensions in adults and children. Journal of anatomy 216: 631-642, 2010.

• 196 • Obermann WM, Gautel M, Steiner F, van der Ven PF, Weber K, and Furst DO. The structure of the sarcomeric M band: localization of defined domains of myomesin, M-protein, and the 250-kD carboxy-terminal region of titin by immunoelectron microscopy. The Journal of cell biology 134: 1441-1453, 1996.

• 197 • Ochala J, Lambertz D, Van Hoecke J, and Pousson M. Changes in muscle and joint elasticity following long-term strength training in old age. Eur J Appl Physiol 100: 491-498, 2007.

• 198 • Ogura Y, Miyahara Y, Naito H, Katamoto S, and Aoki J. Duration of Static Stretching Influences Muscle Force Production in Hamstring Muscles. The Journal of Strength & Conditioning Research 21: 788-792, 2007.

• 199 • Ottenheijm CA, Granzier H, and Labeit S. The sarcomeric protein nebulin: another multifunctional giant in charge of muscle strength optimization. Front Physiol 3: 37, 2012.

• 200 • Pacheco L, Balius R, Aliste L, Pujol M, and Pedret C. The Acute Effects of Different Stretching Exercises on Jump Performance. The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 2991-2998, 2011.

• 201 • Pappas CT, Bhattacharya N, Cooper JA, and Gregorio CC. Nebulin interacts with CapZ and regulates thin filament architecture within the Z-disc. Molecular biology of the cell 19: 1837-1847, 2008.

• 202 • Pappas CT, Bliss KT, Zieseniss A, and Gregorio CC. The Nebulin family: an actin support group. Trends in cell biology 21: 29-37, 2011.

• 203 • Pappas CT, Krieg PA, and Gregorio CC. Nebulin regulates actin filament lengths by a stabilization mechanism. The Journal of cell biology 189: 859-870, 2010.

• 204 • Patel TJ, Das R, Friden J, Lutz GJ, and Lieber RL. Sarcomere strain and heterogeneity correlate with injury to frog skeletal muscle fiber bundles. J Appl Physiol 97: 1803-1813, 2004.

• 205 • Place N, Blum Y, Armand S, Maffiuletti NA, and Behm DG. Effects of a short proprioceptive neuromuscular facilitation stretching bout on quadriceps neuromuscular function, flexibility and vertical jump performance. The Journal of Strength & Conditioning Research Publish Ahead of Print: 10.1519/JSC.1510b1013e3182576ffe, 2013.

• 206 • Prévost P. Etirements et performance sportive : une mise à jour. Kinésithérapie scientifique: 5-13, 2004.

• 207 • Prévost P. Lien entre compliance tendinomusculaire et risque de blessures, in: Tendon et jonction tendinomusculaire : de la biomécanique aux applications thérapeutiques. MH Julia, D.; Croizier, J.-L.; Codine, P.; Hérisson, C.;, ed. Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson, 2011, pp 70-75.

• 208 • Purslow PP and Trotter JA. The morphology and mechanical properties of endomysium in series-fibred muscles: variations with muscle length. Journal of muscle research and cell motility 15: 299-308, 1994.

• 209 • Rancour J, Holmes CF, and Cipriani DJ. The Effects of Intermittent Stretching Following a 4-Week Static Stretching Protocol: A Randomized Trial. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 2217-2222, 2009.

• 210 • Rancour JL, Terry ME, Holmes C, and Cipriani DJ. Superficial precooling on a 4-week static stretching regimen: a randomized trial. Sports health 2: 433-436, 2010.

• 211 • Rassier DE and Herzog W. Force enhancement following an active stretch in skeletal muscle. J Electromyogr Kinesiol 12: 471-477, 2002.

• 212 • Reconditi M, Brunello E, Linari M, Bianco P, Narayanan T, Panine P, Piazzesi G, Lombardi V, and Irving M. Motion of myosin head domains during activation and force development in skeletal muscle. Proc Natl Acad Sci U S A 108: 7236-7240, 2011.

• 213 • REES SS, MURPHY AJ, WATSFORD ML, MCLACHLAN KA, and COUTTS AJ. Effects of Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Stretching on Stiffness and Force-Producing Characteristics of the Ankle in Active Women. The Journal of Strength & Conditioning Research 21: 572-577, 2007.

• 214 • Riley DA and Van Dyke JM. The effects of active and passive stretching on muscle length. Physical medicine and rehabilitation clinics of North America 23: 51-57, x, 2012.

• 215 • Robbins JW and Scheuermann BW. Varying Amounts of Acute Static Stretching and Its Effect on Vertical Jump Performance. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 781-786, 2008.

• 216 • Roberts JM and Wilson K. Effect of stretching duration on active and passive range of motion in the lower extremity. British journal of sports medicine 33: 259-263, 1999.

• 217 • Rowland TW. Children's exercise physiology. Champaing: Human Kinetics, 2005.

• 218 • Rubini EC, Costa ALL, and Gomes PSC. The Effects of Stretching on Strength Performance. Sports Medicine 37: 213-224, 2007.

• 219 • Ryan ED, Beck TW, Herda TJ, Hull HR, Hartman MJ, Costa PB, Defreitas JM, Stout JR, and Cramer JT. The time course of musculotendinous stiffness responses following different durations of passive stretching. J Orthop Sports Phys Ther 38: 632-639, 2008.

• 220 • Ryan ED, Beck TW, Herda TJ, Hull HR, Hartman MJ, Stout JR, and Cramer JT. Do practical durations of stretching alter muscle strength? A dose-response study. Medicine and science in sports and exercise 40: 1529-1537, 2008.

• 221 • Ryan ED, Herda TJ, Costa PB, Defreitas JM, Beck TW, Stout J, and Cramer JT. Determining the minimum number of passive stretches necessary to alter musculotendinous stiffness. J Sports Sci 27: 957-961, 2009.

• 222 • Ryan ED, Herda TJ, Costa PB, Walter AA, and Cramer JT. Dynamics of viscoelastic creep during repeated stretches. Scand J Med Sci Sports 22: 179-184, 2012.

• 223 • Ryan ED, Herda TJ, Costa PB, Walter AA, Hoge KM, and Cramer JT. The Effects of Chronic Stretch Training on Muscle Strength. The Journal of Strength & Conditioning Research 25: S4-S5 10.1097/1001.JSC.0000395586.0000371746.0000395593, 2011.

• 224 • Ryan ED, Herda TJ, Costa PB, Walter AA, Hoge KM, Stout JR, and Cramer JT. Viscoelastic creep in the human skeletal muscle-tendon unit. Eur J Appl Physiol 108: 207-211, 2010.

• 225 • Sady SP, Wortman M, and Blanke D. Flexibility training: ballistic, static or proprioceptive neuromuscular facilitation? Archives of physical medicine and rehabilitation 63: 261-263, 1982.

• 226 • Safran MR, Seaber AV, and Garrett WE, Jr. Warm-up and muscular injury prevention. An update. Sports Med 8: 239-249, 1989.

• 227 • Sainz de Baranda P and Ayala F. Chronic flexibility improvement after 12 week of stretching program utilizing the ACSM recommendations: hamstring flexibility. Int J Sports Med 31: 389-396, 2010.

• 228 • Samuel MN, Holcomb WR, Guadagnoli MA, Rubley MD, and Wallmann H. Acute Effects of Static and Ballistic Stretching on Measures of Strength and Power. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 1422-1428, 2008.

• 229 • Schoenauer R, Bertoncini P, Machaidze G, Aebi U, Perriard JC, Hegner M, and Agarkova I. Myomesin is a molecular spring with adaptable elasticity. Journal of molecular biology 349: 367-379, 2005.

• 230 • Scholz JP and Campbell SK. Muscle spindles and the regulation of movement. Physical therapy 60: 1416-1424, 1980.

• 231 • Seki K and Fetz EE. Gating of sensory input at spinal and cortical levels during preparation and execution of voluntary movement. The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience 32: 890-902, 2012.

• 232 • Seki K, Perlmutter SI, and Fetz EE. Sensory input to primate spinal cord is presynaptically inhibited during voluntary movement. Nature neuroscience 6: 1309-1316, 2003.

• 233 • Sharman MJ, Cresswell AG, and Riek S. Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Stretching: Mechanisms and Clinical Implications. Sports Medicine 36: 929-939, 2006.

• 234 • Sheard P, Paul A, and Duxson M. Intramuscular force transmission. Adv Exp Med Biol 508: 495-499, 2002.

• 235 • Sheard PW and Paine TJ. Optimal contraction intensity during proprioceptive neuromuscular facilitation for maximal increase of range of motion. J Strength Cond Res 24: 416-421, 2010.

• 236 • Shellock FG and Prentice WE. Warming-up and stretching for improved physical performance and prevention of sports-related injuries. Sports Med 2: 267-278, 1985.

• 237 • Shrier I and McHugh M. Does static stretching reduce maximal muscle performance? A review. Clin J Sport Med 22: 450-451, 2012.

• 238 • Siatras TA, Mittas VP, Mameletzi DN, and Vamvakoudis EA. The duration of the inhibitory effects with static stretching on quadriceps peak torque production. Journal of strength and conditioning research / National Strength & Conditioning Association 22: 40-46, 2008.

• 239 • Simão R, Lemos A, Salles B, Leite T, Oliveira É, Rhea M, and Reis VM. The Influence of Strength, Flexibility, and Simultaneous Training on Flexibility and Strength Gains. The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 1333-1338, 2011.

• 240 • Small K, Mc Naughton L, and Matthews M. A Systematic Review into the Efficacy of Static Stretching as Part of a Warm-Up for the Prevention of Exercise-Related Injury. Research in Sports Medicine 16: 213-231, 2008.

• 241 • Smith LL, Brunetz MH, Chenier TC, McCammon MR, Houmard JA, Franklin ME, and Israel RG. The effects of static and ballistic stretching on delayed onset muscle soreness and creatine kinase. Res Q Exerc Sport 64: 103-107, 1993.

• 242 • Spernoga SG, Uhl TL, Arnold BL, and Gansneder BM. Duration of Maintained Hamstring Flexibility After a One-Time, Modified Hold-Relax Stretching Protocol. J Athl Train 36: 44-48, 2001.

• 243 • Stone MR, M. W.; Kinser, A. M. Stretching: Acute and Chronic? The Potential Consequences. Strength and Conditioning Journal 28: 66-74, 2006.

• 244 • Taylor DC, Dalton JD, Jr., Seaber AV, and Garrett WE, Jr. Viscoelastic properties of muscle-tendon units. The biomechanical effects of stretching. Am J Sports Med 18: 300-309, 1990.

• 245 • Tidball JG. Force transmission across muscle cell membranes. J Biomech 24 Suppl 1: 43-52, 1991.

• 246 • Tidball JG and Daniel TL. Myotendinous junctions of tonic muscle cells: structure and loading. Cell and tissue research 245: 315-322, 1986.

• 247 • Tidball JG, Salem G, and Zernicke R. Site and mechanical conditions for failure of skeletal muscle in experimental strain injuries. J Appl Physiol 74: 1280-1286, 1993.

• 248 • Torres EM, Kraemer WJ, Vingren JL, Volek JS, Hatfield DL, Spiering BA, Ho JY, Fragala MS, Thomas GA, Anderson JM, Häkkinen K, and Maresh CM. Effects of Stretching on Upper-Body Muscular Performance. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 1279-1285, 2008.

• 249 • Trinick J. Titin as a scaffold and spring. Cytoskeleton. Current biology : CB 6: 258-260, 1996.

• 250 • Trotter JA and Purslow PP. Functional morphology of the endomysium in series fibered muscles. Journal of morphology 212: 109-122, 1992.

• 251 • Trotter JA, Richmond FJ, and Purslow PP. Functional morphology and motor control of series-fibered muscles. Exerc Sport Sci Rev 23: 167-213, 1995.

• 252 • Tsai KH, Yeh CY, Chang HY, and Chen JJ. Effects of a single session of prolonged muscle stretch on spastic muscle of stroke patients. Proceedings of the National Science Council, Republic of China Part B, Life sciences 25: 76-81, 2001.

• 253 • Tskhovrebova L and Trinick J. Titin: properties and family relationships. Nature reviews Molecular cell biology 4: 679-689, 2003.

• 254 • Tsolakis C, Douvis A, Tsigganos G, Zacharogiannis E, and Smirniotou A. Acute Effects of Stretching on Flexibility, Power and Sport Specific Performance in Fencers. Journal of Human Kinetics 26: 105-114, 2010.

• 255 • Turki O, Chaouachi A, Behm DG, Chtara H, Chtara M, Bishop D, Chamari K, and Amri M. The effect of warm-ups incorporating different volumes of dynamic stretching on 10- and 20-m sprint performance in highly trained male athletes. J Strength Cond Res 26: 63-72, 2012.

• 256 • Turki O, Chaouachi A, Drinkwater EJ, Chtara M, Chamari K, Amri M, and Behm DG. Ten minutes of dynamic stretching is sufficient to potentiate vertical jump performance characteristics. J Strength Cond Res 25: 2453-2463, 2011.

• 257 • Unick J, Kieffer HS, Cheesman W, and Feeney A. The acute effects of static and ballistic stretching on vertical jump performance in trained women. J Strength Cond Res 19: 206-212, 2005.

• 258 • van Mechelen W. Running injuries. A review of the epidemiological literature. Sports Med 14: 320-335, 1992.

• 259 • van Mechelen W, Hlobil H, Kemper HC, Voorn WJ, and de Jongh HR. Prevention of running injuries by warm-up, cool-down, and stretching exercises. Am J Sports Med 21: 711-719, 1993.

• 260 • Voss DE and Knott M. Patterns of motion for proprioceptive neuromuscular facilitation. The British journal of physical medicine : including its application to industry 17: 191-198, 1954.

• 261 • Wallin D, Ekblom B, Grahn R, and Nordenborg T. Improvement of muscle flexibility. A comparison between two techniques. Am J Sports Med 13: 263-268, 1985.

• 262 • Wang JH, Guo Q, and Li B. Tendon biomechanics and mechanobiology--a minireview of basic concepts and recent advancements. Journal of hand therapy : official journal of the American Society of Hand Therapists 25: 133-140; quiz 141, 2012.

• 263 • Wang JH and Li B. Mechanics rules cell biology. Sports medicine, arthroscopy, rehabilitation, therapy & technology : SMARTT 2: 16, 2010.

• 264 • Wang JH and Thampatty BP. An introductory review of cell mechanobiology. Biomechanics and modeling in mechanobiology 5: 1-16, 2006.

• 265 • Wang K. Purification of titin and nebulin. Methods in enzymology 85 Pt B: 264-274, 1982.

• 266 • Wang K. Cytoskeletal matrix in striated muscle: the role of titin, nebulin and intermediate filaments. Adv Exp Med Biol 170: 285-305, 1984.

• 267 • Wang K. Sarcomere-associated cytoskeletal lattices in striated muscle. Review and hypothesis. Cell and muscle motility 6: 315-369, 1985.

• 268 • Wang K, McClure J, and Tu A. Titin: major myofibrillar components of striated muscle. Proc Natl Acad Sci U S A 76: 3698-3702, 1979.

• 269 • Wang K and Ramirez-Mitchell R. A network of transverse and longitudinal intermediate filaments is associated with sarcomeres of adult vertebrate skeletal muscle. The Journal of cell biology 96: 562-570, 1983.

• 270 • Wang K, Ramirez-Mitchell R, and Palter D. Titin is an extraordinarily long, flexible, and slender myofibrillar protein. Proc Natl Acad Sci U S A 81: 3685-3689, 1984.

• 271 • Weppler CH and Magnusson SP. Increasing Muscle Extensibility: A Matter of Increasing Length or Modifying Sensation? Physical therapy 90: 438-449, 2010.

• 272 • Whitehead NP, Weerakkody NS, Gregory JE, Morgan DL, and Proske U. Changes in passive tension of muscle in humans and animals after eccentric exercise. J Physiol 533: 593-604, 2001.

• 273 • Willems ME and Huijing PA. Heterogeneity of mean sarcomere length in different fibres: effects on length range of active force production in rat muscle. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 68: 489-496, 1994.

• 274 • Willems TM, Witvrouw E, Delbaere K, Mahieu N, De Bourdeaudhuij I, and De Clercq D. Intrinsic risk factors for inversion ankle sprains in male subjects: a prospective study. Am J Sports Med 33: 415-423, 2005.

• 275 • Williams L, Howell N, Pagano D, Andreka P, Vertesaljai M, Pecor T, Frenneaux M, and Granzier H. Titin isoform expression in aortic stenosis. Clin Sci (Lond) 117: 237-242, 2009.

• 276 • Wilson A and Lichtwark G. The anatomical arrangement of muscle and tendon enhances limb versatility and locomotor performance. Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B, Biological sciences 366: 1540-1553, 2011.

• 277 • Wilson G. The development of maximal strength: Current and future training strategies. Strength Cond Coach 1: 3-7, 1993.

• 278 • Wilson GJ, Elliott BC, and Wood GA. Stretch shorten cycle performance enhancement through flexibility training. Med Sci Sports Exerc 24: 116-123, 1992.

• 279 • Wilson GJ, Murphy AJ, and Pryor JF. Musculotendinous stiffness: its relationship to eccentric, isometric, and concentric performance. J Appl Physiol 76: 2714-2719, 1994.

• 280 • Witvrouw E, Danneels L, Asselman P, D'Have T, and Cambier D. Muscle flexibility as a risk factor for developing muscle injuries in male professional soccer players. A prospective study. Am J Sports Med 31: 41-46, 2003.

• 281 • Witvrouw E, Lysens R, Bellemans J, Cambier D, and Vanderstraeten G. Intrinsic risk factors for the development of anterior knee pain in an athletic population. A two-year prospective study. Am J Sports Med 28: 480-489, 2000.

• 282 • Witvrouw E, Mahieu N, Danneels L, and McNair P. Stretching and injury prevention: an obscure relationship. Sports Med 34: 443-449, 2004.

• 283 • Witvrouw E, Mahieu N, Roosen P, and McNair P. The role of stretching in tendon injuries. Br J Sports Med 41: 224-226, 2007.

• 284 • Wolf MT, Daly KA, Reing JE, and Badylak SF. Biologic scaffold composed of skeletal muscle extracellular matrix. Biomaterials 33: 2916-2925, 2012.

• 285 • Wood SA, Morgan DL, and Proske U. Effects of repeated eccentric contractions on structure and mechanical properties of toad sartorius muscle. Am J Physiol 265: C792-800, 1993.

• 286 • Woods K, Bishop P, and Jones E. Warm-up and stretching in the prevention of muscular injury. Sports Med 37: 1089-1099, 2007.

• 287 • Woolstenhulme MT, Griffiths CM, Woolstenhulme EM, and Parcell AC. Ballistic stretching increases flexibility and acute vertical jump height when combined with basketball activity. J Strength Cond Res 20: 799-803, 2006.

• 288 • Worrell TW. Factors associated with hamstring injuries. An approach to treatment and preventative measures. Sports Med 17: 338-345, 1994.

• 289 • Yamaguchi T, Ishii K, Yamanaka M, and Yasuda K. Acute effects of dynamic stretching exercise on power output during concentric dynamic constant external resistance leg extension. J Strength Cond Res 21: 1238-1244, 2007.

• 290 • Yeh CY, Chen JJ, and Tsai KH. Quantitative analysis of ankle hypertonia after prolonged stretch in subjects with stroke. Journal of neuroscience methods 137: 305-314, 2004.

• 291 • Yeh CY, Chen JJ, and Tsai KH. Quantifying the effectiveness of the sustained muscle stretching treatments in stroke patients with ankle hypertonia. J Electromyogr Kinesiol 17: 453-461, 2007.

• 292 • Yeh CY, Tsai KH, and Chen JJ. Effects of prolonged muscle stretching with constant torque or constant angle on hypertonic calf muscles. Archives of physical medicine and rehabilitation 86: 235-241, 2005.

• 293 • Youdas JW, Krause DA, Egan KS, Therneau TM, and Laskowski ER. The effect of static stretching of the calf muscle-tendon unit on active ankle dorsiflexion range of motion. J Orthop Sports Phys Ther 33: 408-417, 2003.

• 294 • Young W, Clothier P, Otago L, Bruce L, and Liddell D. Acute effects of static stretching on hip flexor and quadriceps flexibility, range of motion and foot speed in kicking a football. J Sci Med Sport 7: 23-31, 2004.

• 295 • Young W and Elliott S. Acute effects of static stretching, proprioceptive neuromuscular facilitation stretching, and maximum voluntary contractions on explosive force production and jumping performance. Res Q Exerc Sport 72: 273-279, 2001.

• 296 • Young WB and Behm DG. Effects of running, static stretching and practice jumps on explosive force production and jumping performance. J Sports Med Phys Fitness 43: 21-27, 2003.

• 297 • Yucesoy CA. Epimuscular myofascial force transmission implies novel principles for muscular mechanics. Exerc Sport Sci Rev 38: 128-134, 2010.

• 298 • Yucesoy CA, Maas H, Koopman BH, Grootenboer HJ, and Huijing PA. Mechanisms causing effects of muscle position on proximo-distal muscle force differences in extra-muscular myofascial force transmission. Med Eng Phys 28: 214-226, 2006.

• 299 • Zakas A. The effect of stretching duration on the lower-extremity flexibility of adolescent soccer players. Journal of bodywork and movement therapies 9: 220-225, 2005.

• 300 • Zourdos MC, Wilson JM, Sommer BA, Lee S-R, Park Y-M, Henning PC, Panton LB, and Kim J-S. Effects of Dynamic Stretching on Energy Cost and Running Endurance Performance in Trained Male Runners. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 335-341, 2012.



11

Comment développer son équilibre ?

Sommaire

1 • Introduction 489

2 • Un peu de biomécanique... 491

3 • ...et de neurosciences 498

Une abondance d'informations sensorielles 499
Réactif et prédictif 502

4 • Mise en œuvre 509

Amélioration de l'activation musculaire 510
Mobilisation de la musculation centrale et/ou périphérique 512
Maximiser les effets... 515
... Mais éviter les mauvais côtés 517

5 • Affiner le testing 518

6 • Conclusion 519

Bibliographie 520

"La tendance la plus profonde de toute activité humaine est la marche vers l'équilibre."

Jean Piaget, Six études de psychologie, 1987

Nous conseillons fortement la lecture du chapitre 12 sur le gainage en complément de celui-ci.

COMMENT DÉVELOPPER SON ÉQUILIBRE ?

C'est à Sir Charles S. Sherrington, éminent physiologiste anglais, que l'on doit une grosse partie de l'origine du travail en instabilité que nous allons développer dans ce chapitre.
Il a inventé le concept de synapse, travaillé sur les réflexes médullaires, et reçu le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1932, avec Edgar D. Adrian, pour les découvertes faites sur les fonctions des neurones.
Mais c'est surtout son travail sur la proprioception et le contrôle postural qui nous intéresse ici. Il est à l'origine de l'invention du travail sur ballon qu'il a utilisé, entre autres, pour la rééducation des soldats ayant subi de graves blessures pendant la Première Guerre mondiale. La généralisation du travail en instabilité a abouti à la création de matériels de plus en plus variés (figure 1).

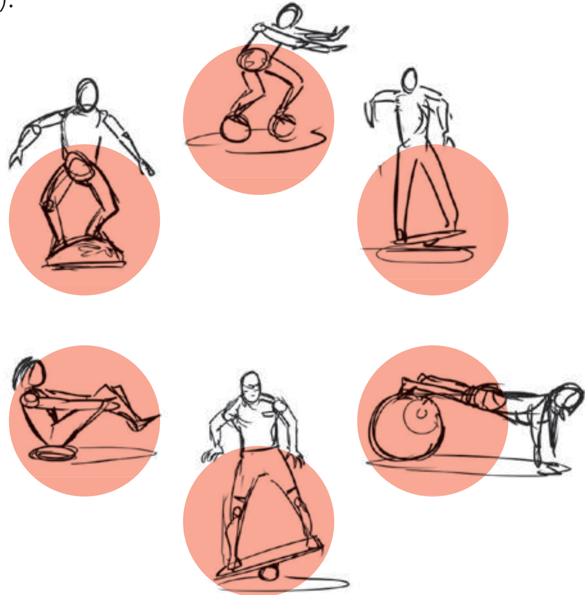


Figure 1 : Exemples de matériels utilisés dans le cadre du travail de l'équilibre.

Nous le verrons, les aspects mécaniques ne sont pas les seuls à entrer en jeu dans l'équilibre. Il y a aussi des aspects neuromusculaires. Nous allons en aborder certains qui sont intéressants pour la pratique sportive même

si les autres peuvent l'être tout autant pour d'autres aspects comme la rééducation ou la réathlétisation et plus récemment le personal training et la préparation physique (figure 2).

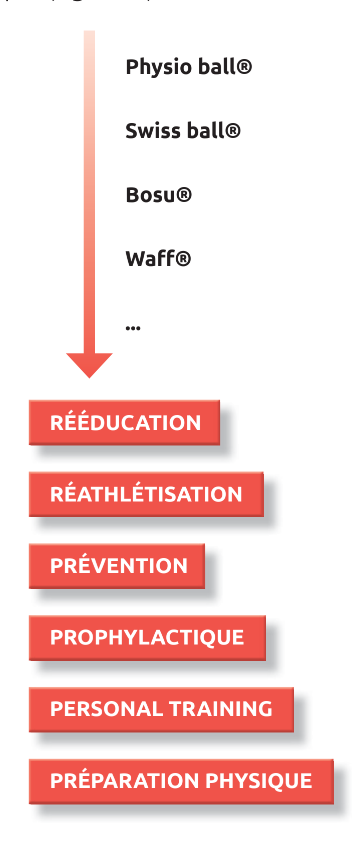


Figure 2 : Champ de pratiques intéressé par le travail de l'équilibre.

Il y va comme pour les autres chapitres des données scientifiques et pratiques, alors accrochez-vous. C'est parti !

1 • Introduction

S'il y a bien quelque chose de surprenant, c'est la capacité qu'ont les sportifs à réaliser des mouvements dans des postures très particulières, improbables ou incroyables par leur originalité. Pensez par exemple à une gymnaste qui fait son enchaînement sur la poutre, à un tennisman qui rattrape la balle en bondissant à la volée pour ensuite se replacer rapidement, à un rugbyman qui est soulevé par ses partenaires pour prendre une balle en touche, à un judoka qui engage une projection comme l'Uchi-mata… notre préférée par son côté spectaculaire (l'adversaire prend littéralement son envol) et radical si on la place au bon moment (un Ippon et on gagne le match).

Toutes ces situations sont aussi surprenantes les unes que les autres, chacune à leur façon, lorsqu'on observe le corps dans son mouvement. Mais elles ont toutes en commun d'avoir été créées à partir d'une situation de relative stabilité avant de passer à une autre plus instable. L'équilibre n'est donc pas quelque chose de statique, de figé, comme on aime à le croire, mais il est bien dynamique.

Pour s'en convaincre, il suffit de vous mettre debout et de fermer les yeux. Demandez à une personne de positionner son doigt ou un crayon au-dessus du sommet de votre crâne ; essayez de rester immobile, et attendez. Après une minute ou deux, la personne qui est à côté de vous observe un phénomène très reproductible : vous oscillez par rapport à la verticale matérialisée par son doigt ou le crayon. Cette oscillation sera d'autant plus marquée que vous êtes peu accoutumé à cette forme d'exercice ou que vous n'êtes pas performant dans l'analyse des informations arrivant des muscles, tendons,… et de l'oreille interne.

Ce que vous faites sans le savoir, c'est un ajustement permanent de votre position par rapport à la verticale de la gravité. Pour se faire, vous utilisez à la fois des informations sensorielles, des informations mécaniques et des informations motrices. Pour illustrer cette situation que nous généraliserons ensuite à toute forme de travail de l'équilibre, regardons la figure 3 qui résume l'ensemble des composantes impliquées :

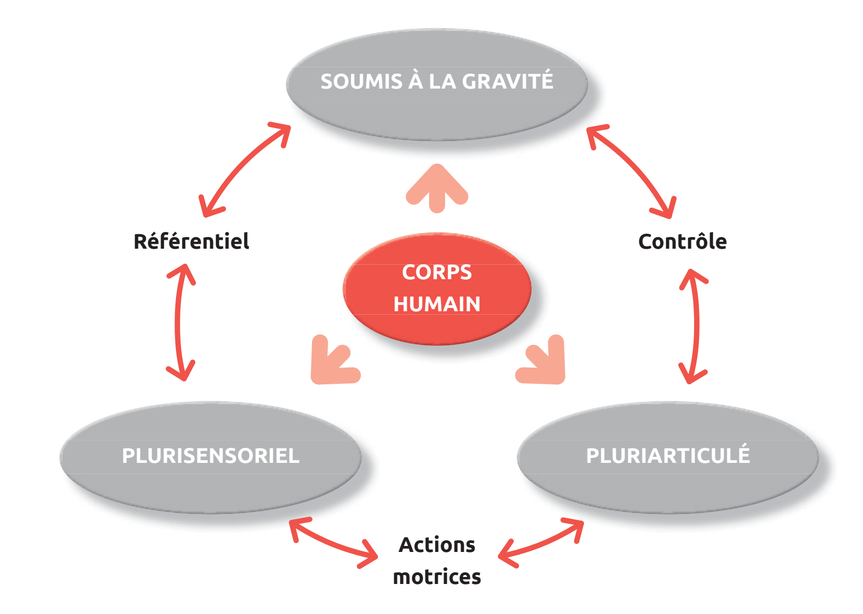


Figure 3 : Représentation des composantes de l'équilibre du corps humain dans son environnement.

Notre corps est bien sûr au centre du système.

La ***partie du bas à droite*** nous montre que notre corps est un ensemble composé de segments (main, bras, pied, jambe, cuisse, tronc, tête) pluriarticulés (cou, épaule, coude, hanche, genou, cheville… pour faire simple… car on pourrait aussi ajouter toutes les articulations entre les vertèbres et les os de la main et du pied par exemple). Il enferme un système nerveux avec deux grands sous-systèmes : sensoriel et moteur ***(partie bas à gauche)***. Leurs interactions vont permettre de générer des actions motrices grâce à l'activation des effecteurs que sont nos muscles ***(milieu bas)***.

La ***partie du haut*** montre qu'il est soumis en permanence à l'influence du champ de l'attraction gravitationnelle de la terre que nous avons intégré en nous comme référentiel incontournable de notre environnement ***(milieu gauche)*** et que nous utilisons pour organiser nos mouvements par des astuces de programmation dont nous évoquerons certains aspects et que l'on regroupe sous le terme de contrôle moteur ***(milieu droite)***.

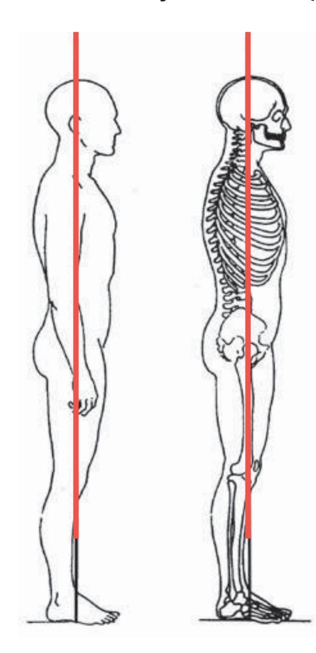
C'est tout cela qui est impliqué dans la gestion et l'entraînement de l'équilibre.

2 • Un peu de biomécanique...

Certaines notions demanderaient à être dépoussiérées mais cela sort du cadre que nous nous sommes donné pour cet ouvrage. Pour les petits curieux, il y a d'autres sources à consulter[32].
Nous vivons dans un environnement où une force est omniprésente et agit sur notre corps en permanence : l'attraction gravitationnelle de la Terre. Nous interagissons en permanence avec elle et cette interaction se manifeste par une ***force*** que l'on appelle ***"poids"***. Sans entrer dans les détails, disons seulement que cette force nous attire en permanence vers le centre de la Terre tout comme nous attirons la Terre vers notre propre centre, notre "centre de gravité" (ou "centre de masse"). D'accord, il y a un petit déséquilibre en faveur de la Terre compte tenu de sa masse ($5{,}9736 \times 10^{24}$ kg, soit en arrondissant 6 000 000 000 000 000 000 000 000 kg... pas mal non ?). On ne peut lutter contre une force d'une telle intensité... à moins d'y mettre le paquet (pensez à l'énergie nécessaire pour arracher du sol une fusée).
Qui dit "force" dit "intensité" (on vient de le voir, elle est très très élevée) mais dit aussi "direction" et "sens". La direction est représentée par une ***droite*** passant par le centre de la Terre et notre centre de gravité, et le sens est toujours orienté vers le centre de la Terre, mais il est tout aussi juste de dire que cette droite est ***perpendiculaire au sol***. On la nomme ***ligne de gravité***. Il est possible de la matérialiser de profil et de noter des repères anatomiques par lesquels elle passe de façon standard. Les ostéopathes, posturologues et autres spécialistes utilisent d'ailleurs cette représentation dans les 3 plans de l'espace pour repérer des anomalies de posture chez leurs patients (Figure 4). Cependant, il existe des variations normales interindividuelles liées à la forme même de nos articulations et à la longueur de nos segments. Cela est facilement repérable sur une radiographie. Il est donc préférable de raisonner en termes de "dynamique posturale" plutôt que d'imaginer une "statique posturale" qui ne reflète en rien la réalité du corps humain.

32 / Un blog : http://rogerrobert.unblog.fr/
et un ouvrage : http://www.roger-robert.com/ histoire de se remuer les méninges !

Figure 4 : Matérialisation de la ligne de gravité de profil (plan sagittal). D'après Basmajian et De Luca, 1985).



Nos pieds sont en contact avec le sol (il paraît) et délimitent une zone particulière : ***la surface (polygone) de sustentation***. Cette sustentation n'a rien à voir avec la nourriture… c'est plutôt une histoire de "soutien", comme pour les ailes d'avion qui sont sustentées ("portées") par l'air qui se déplace le long de la voilure en créant deux forces opposées mais toujours égales. Dans notre cas, la force de réaction du sol (de la Terre) s'exerce vers nous alors que la force du poids est la poussée que nous exerçons sur le sol. Les deux sont toujours égales et de sens opposé (troisième loi de Newton). Cette surface est l'une des trois conditions qui caractérisent l'équilibre d'un corps. Plus elle est grande, plus l'équilibre sera stable. Ainsi, il est plus facile de maintenir son équilibre à quatre pattes que sur deux car la surface est plus grande dans le premier cas. Idem si l'on compare la surface entre les pieds écartés de 60 cm (grande) et les pieds serrés l'un contre l'autre (petite).

Si l'on prend maintenant notre corps dans toute sa complexité, c'est-à-dire tous les segments qui le composent, on remarque que chacun d'eux a son propre volume, sa propre masse, son propre poids (valeurs facilement mesurées avec un cadavre dans une salle de dissection, c'est un peu plus dur avec un corps vivant). On peut représenter le corps de façon simplifiée (5 portions dans cet exemple) comme illustré dans la figure 5.

On y voit plusieurs choses qui vont nous être utiles pour la suite de nos explications. La première (Figure 5b) est que chaque segment est représenté avec son poids (P1 à P4) et son centre de gravité (G1 à G4), ainsi que chaque articulation (O1 à O4) qui relie ces segments. Dans le cas d'un équilibre stable, la projection du centre de gravité G au sol, notée G*, se confond avec le centre des pressions I qu'exercent nos pieds sur le sol. Tous ces segments voient leur centre de gravité aligné sur la ligne de gra-

vité matérialisée par le trait en pointillé. On peut donc résumer la situation comme montré en Figure 5A où le poids $\overrightarrow{P}$, représenté par un vecteur (flèche noire) partant du barycentre des centres de gravité segmentaires, G, est d'intensité égale et de sens opposé à la réaction verticale du sol $\overrightarrow{R_z}$ matérialisée un vecteur (flèche rouge) partant du centre de pression, I.

Pour les matheux, on résume la situation d'équilibre de cette façon, en considérant que la verticale est représentée par un axe appelé Z et que r correspond aux bras de levier des forces en présence (bras de levier nul dans le cas des figures 5a et 5b) :

$$-\vec{P} + \vec{R_z} = 0$$

où les moments de force (gravitaire et musculaire) s'annulent. On est en équilibre. D'où la notion que pour être en équilibre, il faut que le centre de gravité se projette dans la zone délimitée par la surface de sustentation.

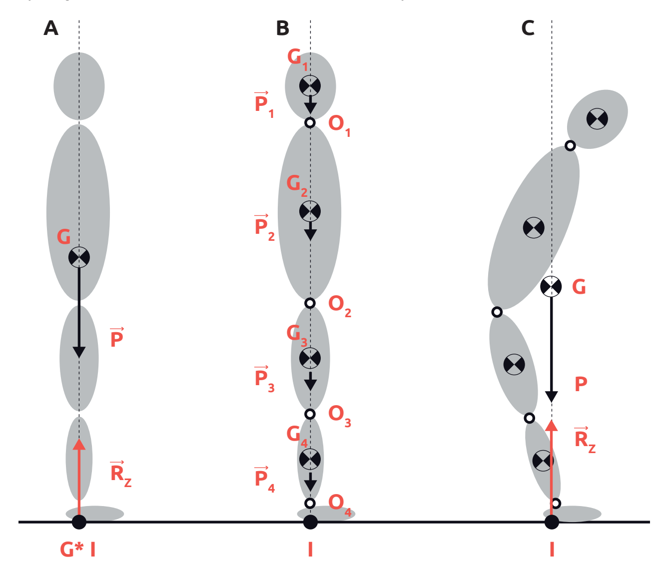


Figure 5 : Représentation schématique d'un corps pluriarticulé de 5 segments. G et G_n : centre de gravité du corps et des segments ; G* : projection du centre de gravité au sol, O_n : centre articulaire ; P et P_n : poids du corps et des segments ; Rz : réaction verticale du sol sur le corps, I : centre des pressions exercées par nos pieds sur le sol. On n'intègre pas le poids des pieds comme expliqué dans le texte. D'après Bouisset (28), p. 252.

Lorsqu'on bouge les segments pour changer de posture et que l'on reste en équilibre stable malgré tout, on obtient la Figure 5C où le centre de gravité G est toujours aligné avec le centre des pressions I mais où les centres de gravité segmentaires ne sont plus alignés sur la ligne de gravité. C'est là que les forces musculaires interviennent de différentes façons comme nous le verrons plus loin. En reprenant l'équation Eq 1, et en l'appliquant à chaque articulation, il est possible de savoir quelle est la force musculaire nécessaire a minima pour maintenir cette posture.

Mais revenons à notre graphique Figure 5C : comment maintenir la posture en question si ce n'est en activant nos muscles ? Il ne faut cependant pas les contracter n'importe comment. Cela va se faire par rapport à leur position vis-à-vis des articulations qu'ils actionnent. Généralement, ils fonctionnent par couples (agoniste-antagoniste). Si l'on reprend la situation ci-dessus, on s'aperçoit que la gravité fait basculer la tête et la partie supérieure du tronc vers la droite et la partie inférieure du tronc ainsi que les cuisses et un peu les jambes vers la gauche, le tout au niveau de l'articulation de la hanche. L'intensité de cette rotation autour de l'articulation de la hanche est fonction de la distance de la masse de chaque segment par rapport à la ligne de gravité. On parle de bras de levier pour désigner cette distance, c'est-à-dire la plus petite distance perpendiculaire entre la ligne de gravité et le centre de gravité. Sachant qu'on peut calculer le moment, ou effet de rotation d'une force, à partir du produit de la force par son bras de levier (M = F x r), on obtient la relation plus générale suivante :

$$-r_p P + r_{R_z} R_z = 0$$

C'est de cette façon (mais en un peu plus complexe) que les biomécaniciens s'y prennent pour calculer les contraintes imposées au niveau d'une articulation.

Un point important ici est la répartition des masses segmentaires dans le corps humain (homme ou femme non obèse). La Figure 6 montre qu'il y a un net déséquilibre en faveur du tronc. Si l'on ajoute la tête, on voit que près de 60 % de la masse corporelle est concentrée dans cette partie centrale. Les biomécaniciens parlent du système HAT *("Head-Arm-Trunk")* car les bras sont attachés au tronc. Le moindre mouvement de cette partie du corps a donc une répercussion immédiate sur notre équilibre. Lors d'un

déséquilibre, nous bougeons nos bras pour rétablir notre équilibre car la masse tête-tronc pourrait nous faire tomber. En faisant cela, nous utilisons un principe mécanique qui est le principe de ***"transfert de mouvement angulaire". Ce concept est très important car il fait partie des principes permettant de créer les exercices d'entraînement de l'équilibre avec d'autres que nous allons aborder dans ce chapitre.*** Toute action musculaire au niveau d'une articulation entraîne les deux segments l'un vers l'autre selon le principe d'action-réaction de Nexton. Cependant nous avons affaire à des rotations. C'est pour cela qu'on dit "mouvement angulaire". Prenons un exemple pour bien comprendre ce principe.

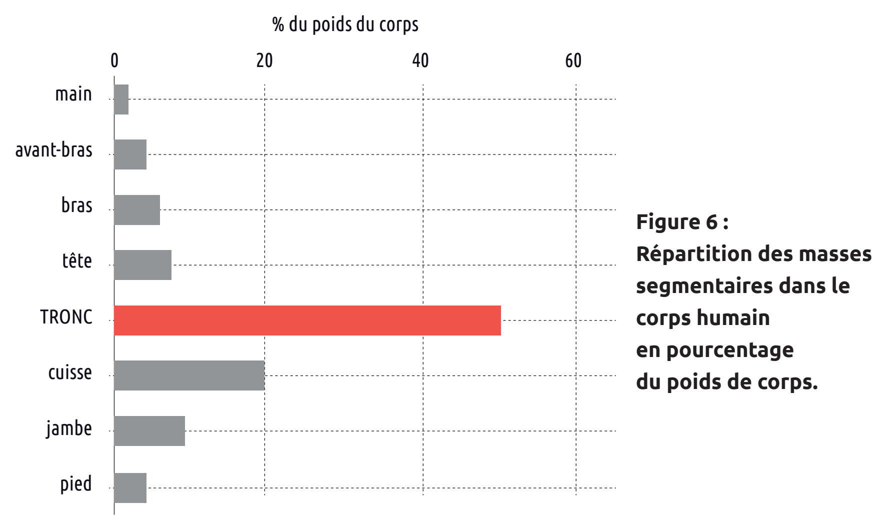


Figure 6 : Répartition des masses segmentaires dans le corps humain en pourcentage du poids de corps.

Imaginez une gymnaste, debout perpendiculairement à l'axe de la poutre : 10 cm de large c'est plutôt étroit, non ? Pas évident de tenir dans cette position. Un instant d'inattention et son tronc bascule vers l'avant dans le sens des aiguilles d'une montre. Il acquiert une vitesse de rotation par rapport à la hanche (notée ω_B sur la figure 7 page suivante). À ce moment-là, la projection de son centre de gravité (CG) ne passe plus par la surface délimitée par ses pieds sur la poutre (carré rouge). La force réaction $\overrightarrow{R_z}$ (flèche noire) et la force poids ($\overrightarrow{P}$) (flèche rouge) ne sont plus alignées sur la même droite (ligne de gravité) : elles sont séparées par une certaine distance (on l'a noté *d* sur la figure).

La gymnaste va devoir faire quelque chose pour se rétablir rapidement, sinon c'est la chute assurée. Spontanément, elle va faire tourner ses bras tendus autour de l'articulation de l'épaule avec une certaine vitesse angulaire (notée ω_A sur la figure), dans le même sens que le mouvement du tronc (donc dans le sens des aiguilles d'une montre). Un mouvement d'antépulsion en quelque sorte. Si l'on considère que le corps est approximativement un cylindre, on peut alors démontrer que ce mouvement angulaire des bras va aider à empêcher la chute d'autant plus facilement que la rotation sera rapide. En réalité, il faut que la vitesse de rotation soit équivalente ou supérieure à celle du tronc pour avoir un effet sur la chute. Le problème est que la vitesse devra être relativement importante du fait de la configuration de l'articulation de l'épaule qui empêche de faire une rotation parfaitement circulaire. La rotation des bras, et la masse mise ainsi en mouvement, vont créer une quantité de moments angulaires dans le sens opposé à celui du tronc.

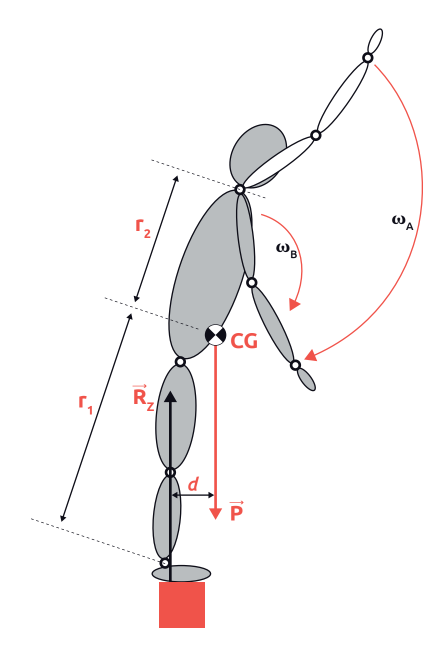


Figure 7 : Rétablissement de l'équilibre : application du principe du moment angulaire.

Une nouvelle fois, pour les plus matheux d'entre vous, on peut résumer cette relation avec l'équation suivante qui permet de déterminer le moment angulaire du corps entier, au niveau de l'axe de rotation passant par la cheville :

$$M_\omega = [I_B + m_B r_1^2 + m_A (r_1 + r_2)^2]\,\omega_B + I_A \omega_A$$

En "clair", si la rotation des bras (A) va de plus en plus vite jusqu'à ce que son moment angulaire soit égal à celui du corps entier, alors le moment angulaire du reste du corps (B) sera égal à zéro. En effet, si la totalité du moment angulaire du corps est due au mouvement des bras, alors le tronc n'aura plus de vitesse angulaire : il ne tombera plus vers l'avant. D'où l'importance de la vitesse de rotation des bras pour 1°) égaler puis surpasser celle du reste du corps afin d'annuler l'effet de rotation dû à l'action de la gravité vers l'avant et stopper ainsi la chute ; puis 2°) avec la vitesse de rotation des bras qui continue, faire basculer le tronc dans le sens inverse pour nous permettre de nous redresser instantanément.

Le terme "instantanément" a son importance car sous l'effet de la gravité, la distance *d* entre le poids et la réaction du sol augmente de façon exponentielle avec le temps. Tout déséquilibre demande donc à être rectifier le plus rapidement possible pour éviter la chute. C'est là que l'entraînement de l'équilibre prend tout son sens. Nous allons le voir : la nature a bien fait les choses puisqu'elle nous a dotés d'un mécanisme permettant d'anticiper ce genre de situation dans la plupart des cas.

Observez aussi un artiste de cirque sur son monocycle et vous verrez ce mécanisme à l'œuvre en permanence, tant qu'il sera en équilibre sur sa roue.

3 • ... et de neurosciences

La figure 9 (p. 500) montre de façon encore plus simplifiée (3 segments) ce qui se passe à chaque articulation sous l'effet de la gravité et sous l'effet de l'action d'un muscle. Les deux moments de force vont dans des sens de rotation opposés. Ainsi, en permanence, pendant que nous sommes debout, nos muscles s'opposent aux effets de la gravité sur notre corps. La complexité du système articulaire augmente la difficulté à trouver des exercices qui pourront servir à améliorer l'équilibre car la forme du corps peut changer rapidement. Cependant, nous l'avons vu plus haut, la stabilité du corps est en grande partie liée à celle du tronc. Elle est même au cœur de toute amélioration de l'équilibre par un entraînement adapté. La première raison est évidemment la masse qu'il représente en pourcentage de la masse corporelle totale. Mais la second raison est liée à la ceinture abdominale et aux contraintes qu'elle va devoir gérer dans les activités sportives.

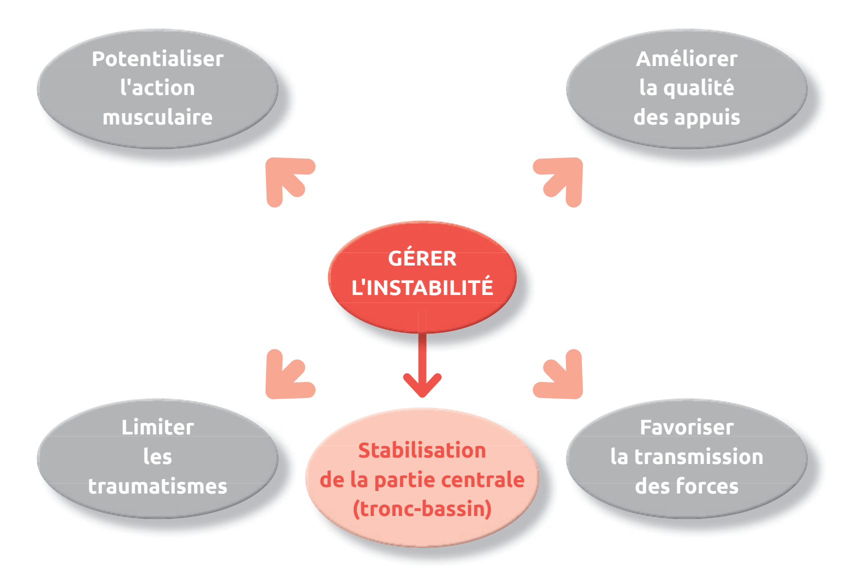


Figure 8 : Rôle central de la stabilité du tronc dans celle du corps entier, et ses implications.

La stabilité du tronc fournit une base solide pour faire les mouvements ou résister à des contraintes extérieures, voire des traumatismes, elle permet une meilleure transmission des forces entre le haut et le bas du corps en toutes circonstances et améliore la qualité des appuis de tous types (figure 8).

Une abondance d'informations sensorielles

Faisons un rapide tour d'horizon des ressources sensorielles de notre organisme pour gérer l'équilibre.
Il existe de nombreux petits mouvements qui se font en permanence lorsque nous sommes debout pour corriger la position de nos segments et nous permettre de tenir debout. Ces petits ajustements sont mis en évidence par la démonstration du maintien debout les yeux fermés que nous avons évoquée en introduction. Ces ajustements sont à la fois liés à la nature même des muscles (cf. chapitre sur la souplesse) de type visco-élastique, mais aussi aux mécanismes nerveux sous-jacents, notamment réflexes.
Nos oscillations sont régulées notamment par les muscles des mollets, en particulier le muscle soleus, dont on sait qu'il contient beaucoup de tissu conjonctif comme tous les muscles dits "toniques" notamment impliqués dans le contrôle posturale. La moindre mise en tension d'un tel muscle déclenche un phénomène de retour élastique qui nous fait revenir à la position initiale, mais aussi un réflexe à l'étirement (réflexe myotatique) qui entraîne une contraction du même muscle via les informations obtenues lors de la variation de longueur et la vitesse à laquelle cette variation se produit (46, 47, 153, 191).
C'est un mécanisme géré au niveau de la moelle épinière. Il est cependant influencé par une formation neuronale appelée ***système réticulé*** (ou formation réticulaire), située dans le tronc cérébral. L'action de cette structure se fait par une boucle réflexe appelée ***boucle gamma***. Elle permet d'ajuster en permanence la sensibilité des capteurs responsables du réflexe myotatique : les ***fuseaux neuromusculaires***, fibres musculaires dotées d'une terminaison nerveuse enroulée autour d'elle et qui se déforment selon les contraintes appliquées au muscle. Ce sont des mécano-

récepteurs combinant une sensibilité statique (longueur instantanée) et une sensibilité dynamique (vitesse d'allongement) (17, 55, 57, 150).
Cette boucle est fondamentale car lorsque le muscle se raccourcit, les fibres sensorielles se relâchent en même temps. Si elles restaient ainsi, il ne serait plus possible pour elles de détecter quoi que ce soit. C'est pourquoi la régulation du tonus de ces fibres est si importante. En les laissant à une longueur optimale grâce à la boucle gamma, le muscle garde toute sa capacité à réagir en fonction de ses variations de longueur ou de vitesse d'allongement. Ce système réticulé permet donc d'ajuster en permanence notre tonus musculaire, contraction résiduelle de nos muscles notamment posturaux. Lorsqu'il diminue sa stimulation, nos muscles voient leur tonus baisser. La démonstration de ce phénomène s'observe lorsque vous somnolez et que vos muscles du cou perdent leur tonus : votre tête tombe d'un coup. Vos muscles ne sont plus capables de contrecarrer l'effet de la gravité au niveau cette articulation (10, 34, 51, 58, 70, 108, 114, 128, 142, 162, 163, 168, 193, 194).

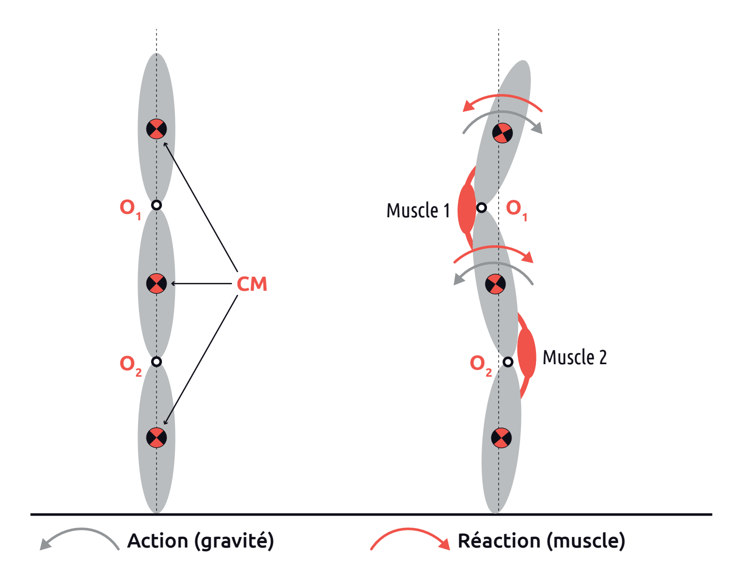


Figure 9 : Exemple de moments angulaires gravitaire et musculaire dans le cas d'un rattrapage de chute par exemple. CM : centre de masse.

À cela s'ajoutent les informations vestibulaires issues des appareils du même nom situés dans l'oreille interne. Ce sont des capteurs spécialisés dans la mesure des accélérations que subit notre corps, qu'elles soient linéaires (gravité pendant le contrôle postural notamment) ou angulaires (mouvement sportif de toute forme) (21, 45, 60, 81, 84, 195). En gros, ils servent à nous orienter dans l'espace, notamment par rapport à la ligne de gravité, mais ils participent aussi à la représentation et à la mémorisation (cartographie) de l'espace (19, 59, 60, 82). Ils sont enfin très utiles à la stabilisation de la posture, la régulation du regard et donc à nos actions orientées vers un but (19, 83, 85, 86, 116, 124, 135, 140, 143, 144, 146-148, 182, 184, 186).

La vue est un axe primordial pour les êtres érigés que nous sommes. Elle est notre outil d'orientation et notre guide pour nos mouvements, notamment en levant l'ambiguïté qui pourrait exister entre un mouvement propre et un mouvement extérieur : imaginez par exemple la sensation que vous avez en percevant le mouvement d'un train à côté de celui dans lequel vous êtes (18).

Dans certaines circonstances nous pouvons suppléer à son absence sans problème majeur. Pensez simplement aux capacités des aveugles, aux découvertes récemment faites sur la vision aveugle... la vision sans voir. Car nous aurions en réalité une vision inconsciente cognitive dont le potentiel commence tout juste à être explorer même si on soupçonne sa présence depuis de nombreuses années[33] .

Les capteurs cutanés ne sont pas en reste non plus tant au niveau de la main que de la voûte plantaire, ou d'autres parties du corps. Ils participent à la régulation de la force de préhension, au contrôle postural, tout ça à partir d'informations issues seulement de l'extérieur, avec quelquefois des comportements atypiques ou inattendus (11, 23, 99-101, 112, 129, 188, 189). Les plus intéressants pour nous sont ceux liés aux pressions du pied sur le sol et leur interaction avec les muscles du mollet (94, 95) ainsi que les interactions qu'entretiennent ces différentes modalités sensorielles pour

33 / Lire le très bon article de la spécialiste de neurosciences cognitives, Béatrice de GELDER, paru sur ce sujet dans la revue Pour la Science, n° 398 de décembre 2010 : "La vision aveugle : voir sans en avoir conscience".

donner une information au système nerveux qui soit la plus juste possible. Certaines interactions sont d'ailleurs sujettes à des variations pouvant perturber le contrôle posturale (fatigue, vibration, froid,...) (68, 87, 89, 91, 92, 103, 105, 164, 165, 192).

La figure ci-après résume très simplement l'ensemble de ces données mais ne fait pas figurer l'ensemble des interactions pour éviter de surcharger le schéma.

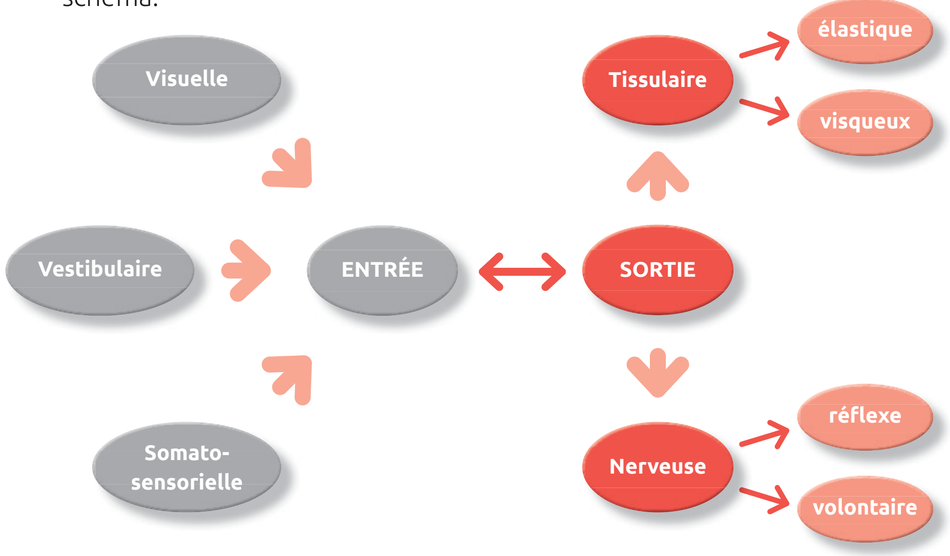


Figure 10 : Entrées et sorties permettant d'alimenter le système de contrôle de notre posture.

Réactif et prédictif

Dans le contrôle de la posture, deux mécanismes ont été mis en évidence au niveau nerveux. L'un correspond à des ajustements qui se déroulent au niveau central et l'autre au niveau périphérique. Les premiers sont de type prospectif (ou prédictif), les seconds de type rétroactif (réactif). Nous avons largement développé cet aspect dans nos propres travaux de recherche.

Nous évoquerons plusieurs aspects fondamentaux pour la compréhension des mécanismes d'adaptation et de perturbation de la posture dont nous nous servirons pour expliquer l'intérêt de tel ou tel exercice pendant un entraînement.

Nous l'avons évoqué, la tête est reliée au tronc et forme avec les bras un système à part entière dans la bipédie. C'est pourquoi beaucoup de travaux lui ont été consacrés. Parmi eux, il est ceux de Pozzo et de Berthoz qui ont démonté que la tête était stabilisée dans l'espace pendant nos déplacements afin de stabiliser notre vision et faciliter ainsi l'interprétation issue de ce canal sensoriel : la tête se comporte alors comme une plateforme inertielle qui reste horizontale le plus longtemps possible pendant nos actions motrices (38, 143-148). Cependant, une fois les yeux fermés, elle ne sert plus à grand-chose et nous devons nous fier aux autres entrées pour gérer notre posture et nos mouvements.

Une autre particularité de nos informations sensorielles est qu'elles mettent toutes, sans exception, un certain délai à arriver dans les centres de traitement pour en tirer les données nécessaires à la gestion de nos mouvements.

C'est pourquoi il a été émis l'hypothèse d'une gestion anticipée du résultat de nos actions pour ensuite les comparer à ce qui s'était passé pendant et à l'issue du mouvement grâce aux informations issues de nos capteurs sensoriels. Le cerveau se comporterait alors comme un simulateur provoquant ou non la mise en action des effecteurs que sont les muscles selon les besoins. Deux ouvrages remarquables sur cette thématique ont été édités très récemment et couvrent l'ensemble des recherches publiées pour enrichir votre connaissance du sujet (20, 97, 98). Nous ne ferons que balayer les informations pertinentes pour nos propos.

Cette capacité du cerveau à prévoir le résultat de nos actions a été montrée par l'intermédiaire d'une expérience aussi amusante qu'élégante. Imaginez que vous êtes au café et que le garçon vous apporte votre expresso avec un petit verre d'eau. Il y a beaucoup de monde en terrasse et l'accès à la table n'est pas aisé. Vous voulez l'aider en prenant la carafe et le verre d'eau et lui laisser la partie la plus facile : la tasse de café. Mais voilà, il y a un gros souci ! En faisant cela, vous créez une perturbation de la posture du garçon et le plateau

se met à s'élever plus que prévu, manquant de lui faire renverser son contenu. Pourquoi, alors qu'en le faisant seul, cela ne se serait pas produit ? C'est la question à laquelle ont tenté de répondre Massion et ses collaborateurs en faisant l'expérience grâce un système très astucieux et très reproductible. Elle montre la chose suivante : si nous prenons nous-même un objet sur le plateau, comme nous avons programmé l'action et imaginé ce qui se passerait en enlevant le verre d'eau ou la carafe, nous anticipons le résultat de notre action et ajustons en temps réel le tonus de nos muscles posturaux et de ceux qui prennent l'objet pour limiter la perturbation de la posture que représente le délestage du plateau (5, 6, 53, 80, 120, 121, 123, 181).

Autre question : vous vous tenez debout et tendez vos deux bras en même temps pour attraper votre manteau suspendu à une patère. Quels sont les premiers muscles à s'activer ? Spontanément, vous répondrez les deltoïdes antérieurs, et nous vous dirons... faux : ce sont les muscles soleus. Pourquoi ? Parce qu'en projetant vos bras vers l'avant, vous mettez votre corps en déséquilibre dans la même direction. Rappelez-vous ce que nous avons évoqué plus haut : tout mouvement segmentaire entraîne une variation de la projection du centre de masse sur le sol. S'il sort de la surface de sustentation, c'est la chute.

Allez, une petite dernière : pourquoi, lorsque vous vous chatouillez, vous ne ressentez rien, alors que si quelqu'un d'autre le fait vous risquez de vous trémousser sans pouvoir vous contrôler ? Exactement pour les mêmes raisons : dans le premier cas, vous connaissez le résultat de votre action et anticipez l'effet du grattement de doigt sur votre peau, chose impossible dans le second cas car c'est quelqu'un d'autre qui va le faire à votre place. Vous ne pourrez que réagir et non anticiper. Daniel Wolpert, un neuroscientifique que nous apprécions beaucoup, a donné une conférence en juillet 2011 pour TED qui explique de façon très amusante tout ce que nous venons d'exposer (vidéo en anglais VOSTR) [34].

Le cerveau apprend à apprivoiser la force de gravité au cours de notre développement en l'intégrant aux potentiels patterns dont nous disposons déjà à la naissance (voir p. 348 ; 13, 88, 90). On pense même qu'il a internalisé cette grandeur physique au point de l'intégrer dans toutes les actions sans

34 / http://www.ted.com/talks/daniel_wolpert_the_real_reason_for_brains.html

qu'on en ait conscience. C'est quand elle est absente que nous commençons à justement en prendre conscience. Les expériences réalisées en microgravité temporaire (vols en Airbus Zéro-G) ou de plus longue durée (navette spatiale) ont permis d'apporter des éclairages précieux pour nous aider dans nos propres constructions de programmes de développement de l'équilibre, notamment chez les plus jeunes pour qui les choses ne sont pas encore claires (44, 64-67, 93, 115, 125-127, 148, 149, 166, 167, 174-176, 183).

Ces ajustements de notre corps, de son orientation, du tonus musculaire, du niveau d'intensité des effecteurs ont été prévus en amont du mouvement lui-même. C'est pour cela qu'ils ont été appelés ***ajustements posturaux anticipés***. Aujourd'hui encore ils continuent à être explorés car c'est une fenêtre ouverte sur la façon dont le cerveau s'y prend pour prendre à la fois la configuration du corps à l'instant présent (schéma corporel), ce qu'il est réellement capable de faire avec (contraintes biomécaniques), les éventuels problèmes rencontrés pendant la réalisation du mouvement (mémoire) et les ajustements nécessaires pour le faire en toute sécurité. Mais comme on sait également que l'anticipation se construit au cours de la maturation du système nerveux (22, 31-33, 64, 111, 161, 185), il est toujours de bon aloi de continuer à questionner l'ensemble de ces processus tant qu'ils ne nous ont pas révélé tous leurs secrets, notamment par la mise en place d'expériences plus proches des mouvements naturels, réalisés sans contraintes particulières, ou encore chez des patients (29, 30, 109, 110, 119, 122, 133, 134, 139, 171, 172, 177, 178).

L'***anticipation*** fait partie intégrante des processus moteurs pour gérer nos mouvements (25, 26) et cela se joue à quelques dizaines de millisecondes seulement, entre deux mouvements, prévu et imprévu, en termes de stabilité (37, 64, 67, 79, 104, 106, 107, 113, 149, 166). L'impossibilité d'anticiper une perturbation impose des contraintes bien plus importantes sur le corps que si on s'y est préparé, comme cela a été montré par exemple sur la charnière lombo-sacré dans des exercices où le sujet ne pouvait prévoir la perturbation infligée au tronc (179). Il est donc des moments où cela n'est pas possible, soit parce que nous ne l'avions pas prévu, soit parce que nous avons dépassé nos capacités d'anticipation en délai ou en quantité d'informations à gérer pour construire notre solution ad hoc, soit encore

parce que la situation nous est totalement inconnue et que nous faisons avec les moyens du bord. Dans ce cas, nous devons élaborer de nouveaux plans d'action (stratégies) pour réussir à produire une solution rapide, efficace et adaptée à la situation. C'est tout cela que propose un entraînement permettant de développer l'équilibre.

L'ensemble des stratégies que nous mettrons en œuvre a été très bien résumé par Paillard (137), encore un grand physiologiste qui a fortement contribué à notre compréhension du contrôle postural. La Figure 11 résume ces stratégies. D'autres travaux ont démontré l'importance de ces stratégies grâce à l'étude de certaines maladies neurologiques (4, 35, 36, 50, 74-78, 96, 118, 169, 170), pour arriver à la conclusion que les stratégies de gestion de l'équilibre reposaient sur une logique déjà pressentie par Paillard (138) et enrichie ou développée depuis (29, 76, 96).

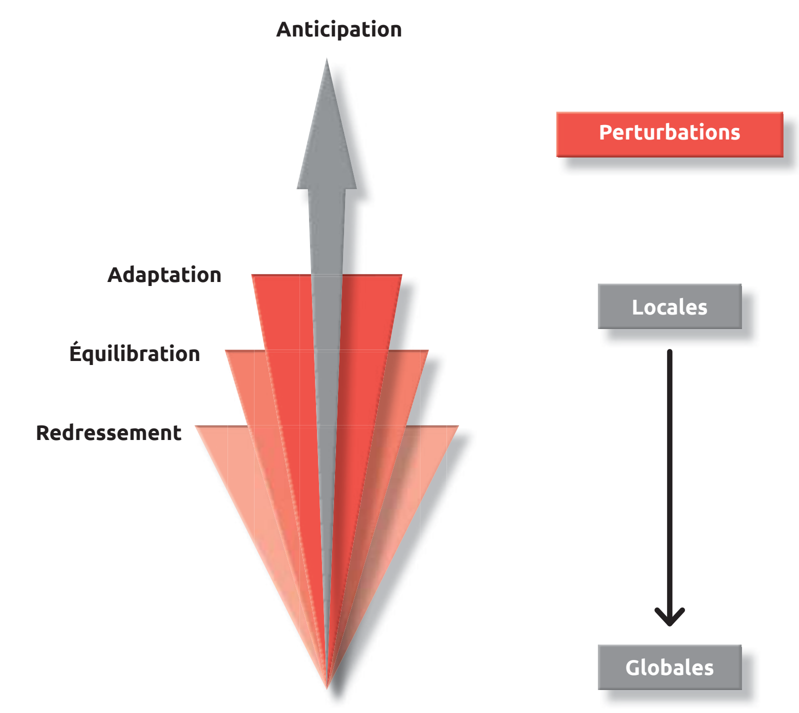


Figure 11 : Les différents niveaux de gestion de l'équilibre selon le type de perturbation. D'après Paillard (137).

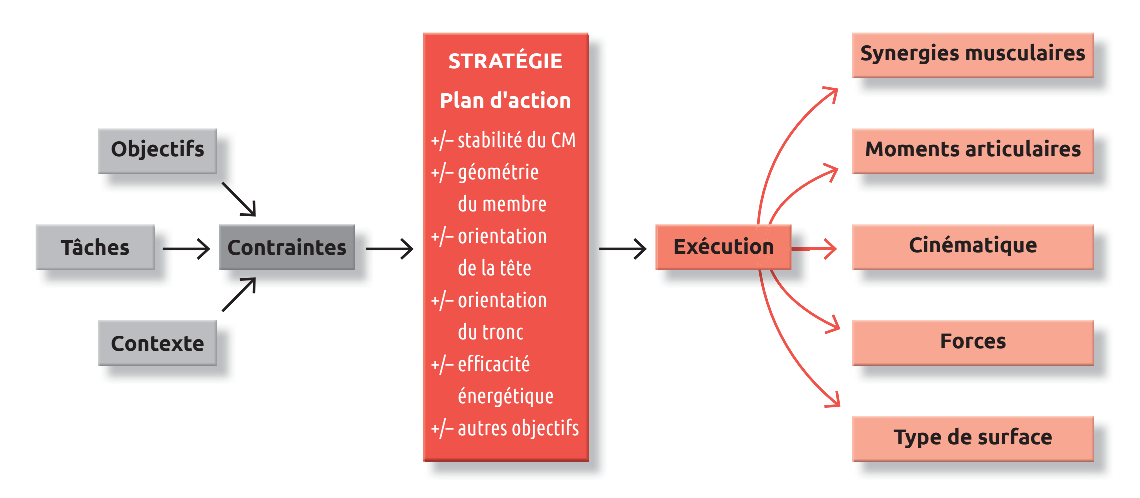


Figure 12 : Stratégies et composantes liées à la gestion et l'entraînement de l'équilibre. Adapté de Horak (76).

Nous avons celles de stabilisation de la tête, du fait qu'elle contient les capteurs visuels et vestibulaires, cela entraîne l'adoption de stratégies reproductibles dans un contexte donné. Par exemple, il a été démontré qu'il existe 3 stratégies de gestion du déséquilibre en fonction de la contrainte imposée : une stratégie de cheville, une stratégie de hanche et une stratégie mixte, telles qu'illustrées par la Figure 13.

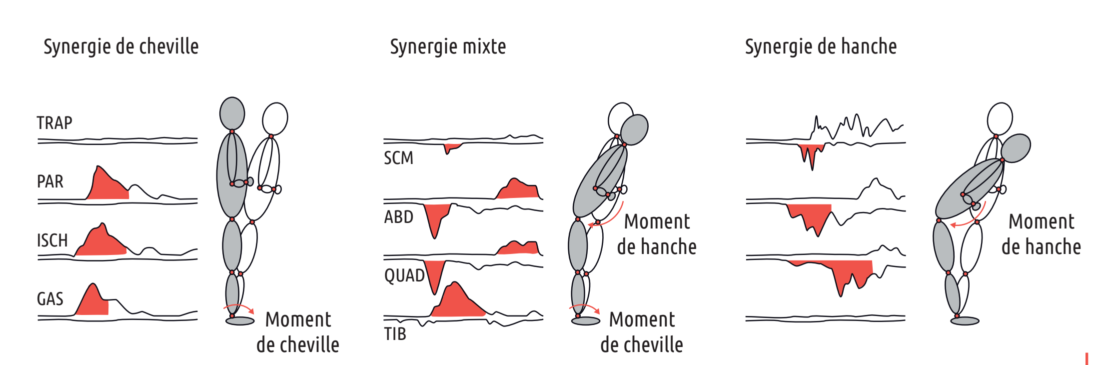


Figure 13 : Trois stratégies d'équilibre en fonction de la perturbation imposée à la posture debout (76). TRAP = trapèze ; PAR = paravertébraux lombaires ; ISCH = ischio-jambiers ; GAS = gastrocnémiens ; SCM = sterno-cléido-mastoïdien ; ABD = droit de l'abdomen ; QUAD = quadriceps ; TIB = tibial antérieur.

L'apprentissage peut nous faire privilégier une stratégie plutôt qu'une autre alors qu'au départ elle n'était pas forcément la plus facile à utiliser. Les 3 stratégies citées sont utilisées en fonction de l'importance de la perturbation la plus faible à la plus élevée. Mais lorsqu'on regarde une gymnaste experte sur une poutre, on est rapidement surpris pas le fait qu'elle utilise très peu la stratégie de hanche et privilégie celle de cheville ou mixte, contrairement à une moins experte. Lors de l'entraînement, on les sensibilise aux pénalités qu'elles peuvent avoir en fonction du niveau de déséquilibre noté par le juge (code FIG). Elles vont donc non seulement s'adapter à gérer leur équilibre avec la stratégie la plus difficile à maîtriser mais l'exercice même de la poutre va contribuer, à chaque entraînement, à l'amélioration des processus de traitement de l'information sensorielle, à la programmation d'un mouvement de plus en plus précis et fluide et à un contrôle du tronc de plus en plus fin grâce à la tonicité de la ceinture lombo-abdominale. On observe le même phénomène chez les danseuses expérimentées qui ont un meilleur contrôle des mouvements de leur tronc (12, 130). La connaissance de l'exercice améliore donc les synergies musculaires (173).

Un juge ancien gymnaste sera même plus sensible à ces petites perturbations pour les avoir lui-même vécues dans sa carrière d'athlète (141) ; une raison supplémentaire pour travailler l'équilibre de façon adaptée et ciblée car on ne peut pas toujours duper ses pairs.

PROPRIOCEPTION

Sensibilité du système nerveux aux informations provenant des muscles, des articulations et des os (Larousse Médical) relatives à la position et au mouvement de chaque segment du corps.

ÉQUILIBRE

État de repos, position stable d'un système obtenue par l'égalité de deux forces, de deux poids qui s'opposent : mettre les plateaux d'une balance en équilibre.

ÉQUILIBRATION

Fonction qui assure aux animaux et à l'homme la maîtrise de leur équilibre.

ÉQUILIBROCEPTION

Ensemble des informations liées à l'équilibration et à la proprioception qui permet de gérer l'équilibre auquel s'ajoutent les informations vestibulaires.

4 • Mise en œuvre

Ce type d'entraînement de l'équilibre (et indirectement celui de la stabilité centrale) a été analysé par de nombreux auteurs qui ont démontré son utilité pour les aspects stables ("statique") et instables ("dynamique") de l'équilibre, la prévention de certaines blessures de genou, de dos, l'amélioration des performances, la capacité de réactivité des appuis, l'entraînement neuromusculaire (7, 15, 27, 48, 49, 56, 102, 190).
L'objectif premier du travail de l'équilibre va être de cibler les muscles posturaux, profonds, centraux grâce à l'utilisation de situations spécialement conçues à cet effet, avec ou sans matériels additionnels. Très souvent, ils vont s'apparenter à un travail de gainage qui mobilise justement ces muscles profonds. Nous résumons de façon très succinctes les éléments dont nous avons besoin pour choisir les situations, le matériel, les modes de perturbation éventuelle, la complexité de la tâche à réaliser (Figure 14).

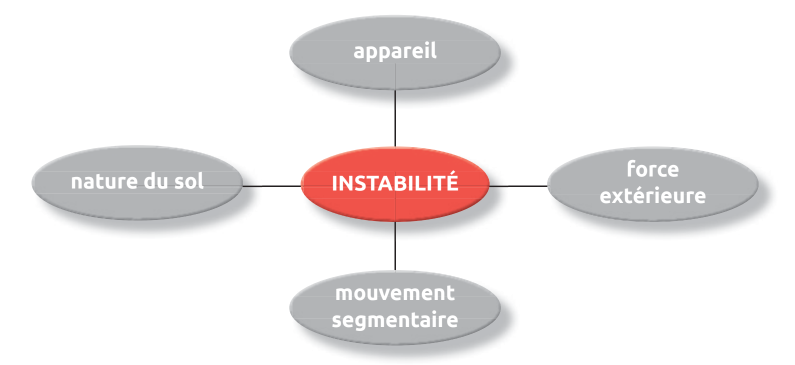


Figure 14 : Les éléments à prendre en compte dans le choix des exercices d'instabilité.

Une analyse de la littérature, à partir notamment des travaux ayant utilisé l'enregistrement électromyographique (EMG) de surface des muscles pour explorer l'impact de ces différents paramètres, permet de valider nos choix et d'éviter les erreurs les plus communes tout en confortant la stratégie mise en place pour aider à améliorer les capacités d'équilibre.
Nous l'avons évoqué en introduction : il existe une multitude de matériels

permettant de perturber la posture et donc de travailler l'équilibre (Dyna-disc®, BOSU®, Swiss-Ball®, plateau de Freeman, plus récemment Waff®, GymStick®, Jungle Gym XT®, etc.).

Quatre implications majeures ressortent de cette analyse :

1 • L'idée selon laquelle tout support aurait des effets équivalents sur la musculature profonde pour le travail du gainage par exemple, n'est pas soutenue par les résultats scientifiques. Par ailleurs, il a été mis en évidence une grande variabilité interindividuelle selon l'appareil utilisé concernant les stratégies de contrôle postural utilisées ; elles peuvent induire des sollicitations différentes sur la musculature pour un même appareil pouvant aboutir à un effet non souhaité ou à l'absence d'effet.
2 • Le niveau de condition physique de la personne ainsi que sa spécialité sportive ont un impact sur la capacité à gérer l'instabilité sur de tels supports ; le choix de l'appareil doit donc être fait de façon judicieuse si l'on souhaite obtenir des bénéfices réels.
3 • Enfin, l'analyse de certaines contraintes sur les chaînons articulaires impliqués dans la stabilité posturale montre que les consignes données par le thérapeute ont une incidence sur la qualité du travail réalisé sur ces appareils. Voir p. 270-271 par exemple.

Voyons un peu plus en détails ces différents points pour en comprendre les implications dans les séances.

Amélioration de l'activation musculaire

Lors d'un travail sur support instable, on note une nette amplification de l'activité EMG des muscles mais, en contrepartie, on a une diminution de la force produite. C'est un phénomène de compensation qui s'enclenche dans ce genre d'exercice. L'activation est accentuée dans la partie centrale au détriment de la partie périphérique car c'est dans la partie centrale du corps que se situent les muscles les plus à même de contrecarrer la perturbation liée à l'instabilité ; mais il peut tout aussi bien accentuer le travail

des muscles principalement sollicités dans le mouvement choisi (9, 52, 117, 196). La possibilité d'une activation plus sélective d'un groupe musculaire par rapport à une autre reste une spécificité de ce type de travail (132).

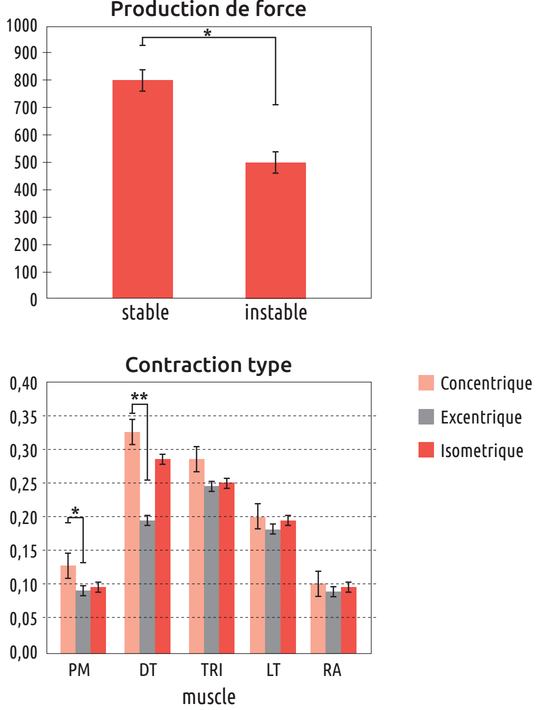


Figure 15 : Modification des activités musculaires et de la production de force en fonction du support stable (a) ou instable (b) pendant une poussée isométrique. La force résultante est plus faible sur support instable mais cette diminution accentue le travail sur les muscles pectoralis major (PM) et deltoid anterior (DT). Il n'y a aucune incidence sur les triceps brachii (TR), le latissimus dorsi (LT) et le rectus abdominus (RA). D'après Anderson et Behm (4).

Ce type d'exercice est donc intéressant pour tous les publics, en sachant néanmoins que cela va affecter les capacités maximales de force, puissance et vitesse, mais aussi le pic de force excentrique et la profondeur à laquelle est réalisé le mouvement comme dans le cas du squat par exemple. Il est recommandé de ne pas dépasser 8 semaines d'entraînement avec cette forme de sollicitation.

En effet, une mise en garde a été faite récemment concernant l'usage du SwissBall® (surtout si l'on souhaite conserver un haut niveau d'activation musculaire à l'issue d'une séquence d'entraînement en instabilité) (41, 155-157, 187). Malgré tout, l'intérêt de ces outils est, pour les personnes débutantes ou en réathlétisation, de travailler sur les mouvements de renforcement musculaire avec des charges plus légères ou d'activer des muscles qui le sont moins sur support stable (154, 157, 180). La diminution de charge liée à l'instabilité est en grande partie compensée par une augmentation du niveau d'activation musculaire. Une excellente nouvelle quand on sait que beaucoup des gains en entraînement en force sont liés aux facteurs nerveux (159, 160). Cependant, selon le niveau de la personne et le mouvement réalisé, ces effets ne sont pas forcément reproductibles pour tous les groupes musculaires (9). Il est donc plus prudent de faire un microcycle pour vérifier comment le sujet réagit à la forme de travail proposée avant de perdre du temps.

Mobilisation de la musculation centrale et/ou périphérique

On associe souvent stabilité du tronc et mobilisation de la ceinture lombo-abdominale. Les forces externes ou les mouvements segmentaires perturbant la position du tronc affectent autant la musculature profonde qui maintient le rachis que celle qui rend solidaire le tronc du bassin.
Cependant, les formes les plus appropriées de sollicitation doivent rester proches de celles rencontrées sur le terrain. Le mimétisme doit être la règle du jeu lors que la mise en place des ateliers, comme nous l'illustrerons avec plusieurs photos prises lors de ce type de séance avec différentes spécialités.
Mais regardons comment se fait l'engagement de ces différentes synergies musculaires dans le travail instable en prenant comme exemple ce qu'ont obtenu Anderson et Behm (8) en squat avec une machine Smith, en standard et avec des Dynadisc® sous chacun des pieds. Ils ont enregistré en même temps les muscles suivants : erector spinae lombaire supérieur (ESSu), erector spinae lombo-sacré (ESSa), soleus (SOL), biceps femoris (BF), vastus lateralis (VL), stabilisateurs abdominaux (SAb).

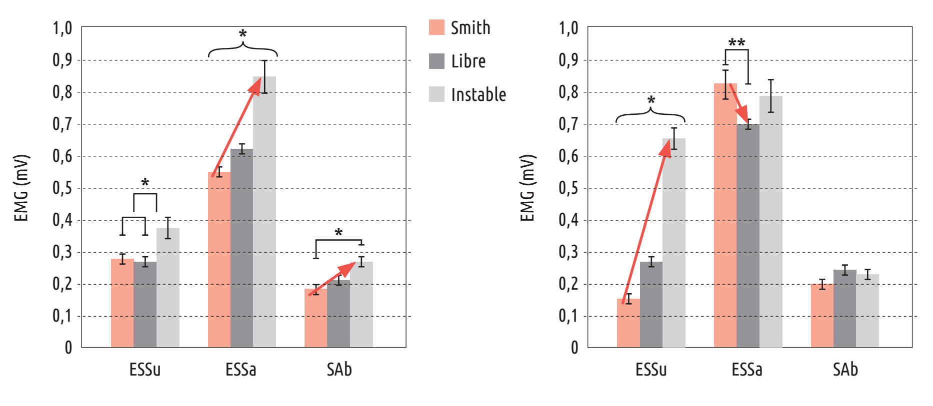


Figure 16 : Activation des muscles du tronc et des membres inférieurs dans 3 conditions de réalisation du squat.
*** : effet significatif.**

La Figure 16 montre que plus l'instabilité est élevée plus on engage les muscles proches de la colonne vertébrale, de la ceinture lombo-abdominale et de contrôle de la cheville. Le soleus étant le principal muscle antigravitaire (il nous empêche de tomber en avant quand nous sommes debout), il est d'autant plus sollicité que la surface est instable et que le tronc bouge. On note également une diminution significative du vastus lateralis, muscle principalement engagé dans l'extension du genou.

La Figure 17 confirme ce que nous disions plus haut, à savoir que l'instabilité cible la phase concentrique en mouvement davantage que la phase excentrique du fait de la perturbation de l'équilibre qu'il faut contrecarrer pendant toute la phase de poussée. Mais le plus intéressant reste à venir.

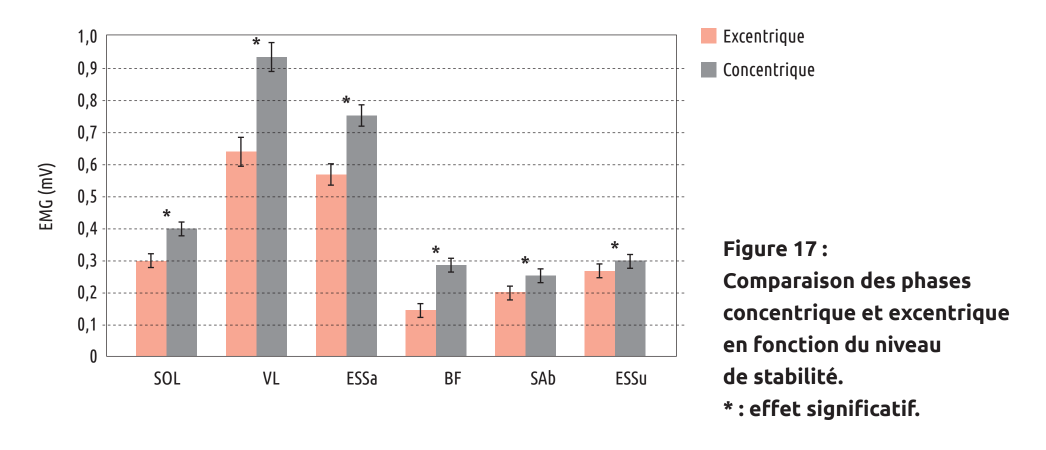


Figure 17 : Comparaison des phases concentrique et excentrique en fonction du niveau de stabilité.
*** : effet significatif.**

La Figure 18 suivante donne le décours temporel des activités électriques des muscles cités. Les phases excentrique (descente) et concentrique (montée) sont indiquées avec la phase de transition matérialisée par la ligne verticale. Nous avons indiqué avec le cercle et la flèche l'activation privilégie de la partie antérieure (abdominale) de la ceinture lombo-abdominale pendant que la partie postérieure (lombaire) l'est de façon croissante jusqu'à ce que le sujet engage la poussée. La partie postérieure contrôle donc en permanence l'inclinaison de la colonne vertébrale et la partie antérieure va venir protéger les lombaires dans la phase de transition excentrique-concentrique. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour essayer d'expliquer ce regain de vivacité de ces muscles sans pour

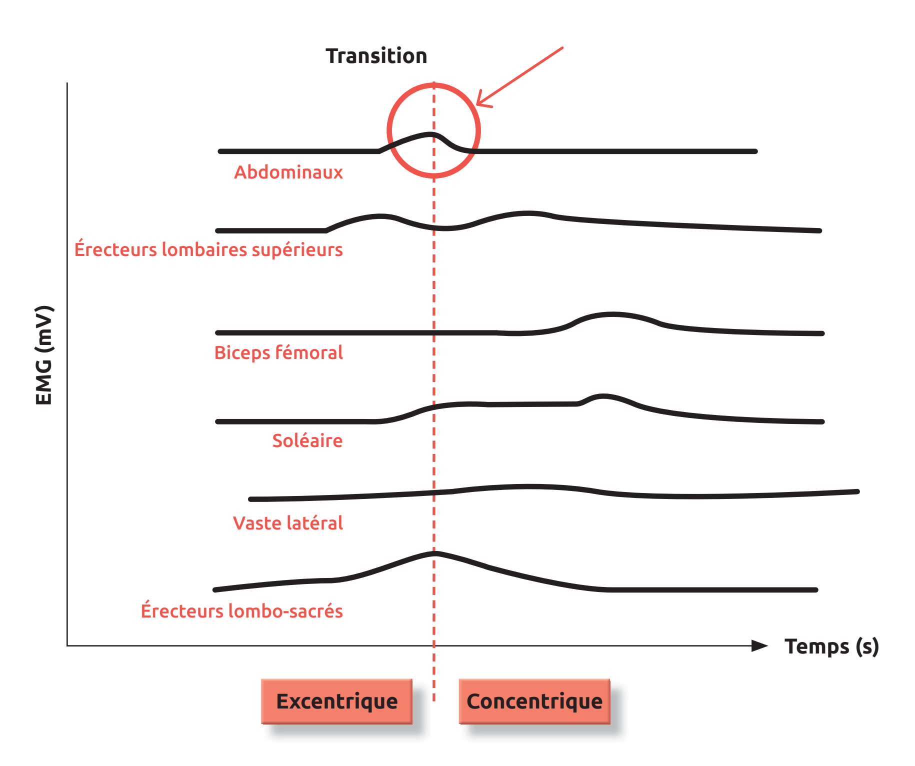


Figure 18 : Décours temporel des activités EMG pendant le squat réalisé dans 3 conditions de stabilité différentes. D'après (8).

autant les départager : augmentation de pression intra-abdominale pour stabiliser la colonne lombaire par l'activation du transversus abdominis (42, 152) ou simplement une désactivation des muscles abdominaux antérieurs pour éviter les phénomènes de cisaillements vertébraux (69). Cependant, il a été démontré que le transversus abdominis était d'autant plus sollicité que le mouvement était rapide. Ce qui n'est pas le cas ici. Or, la vitesse du mouvement est aussi le paramètre qui influence sur la pression intra-abdominale permettant ainsi d'augmenter la raideur de la colonne vertébrale au niveau lombaire, empêchant ainsi les cisaillements évoqués plus haut (71-73). Dans un mouvement lent, selon le phénomène de flexion-extension (61-63, 131), ce serait plus la composante élastique des muscles érecteurs que l'on solliciterait à mesure que l'allongement des fibres se fait, et l'augmentation de l'activation des muscles abdominaux antérieurs servirait alors de support à la colonne lombaire.

Ce travail, et d'autres du même genre, montre bien la dissociation entre la stabilisation globale et la stabilisation locale (16, 39, 40) ou bien entre la force musculaire synthétique ou analytique (28) pour aider à construire des situations répondant à nos besoins, notamment accentuer la sollicitation neuromusculaire dans la composante de gestion de l'équilibre qui est de loin l'une des plus efficaces pour limiter la "bobologie" classiquement rencontrée chez les sportifs. Cette composante neuromusculaire fait la part belle au muscle transversus adbominis par sa position privilégiée dans la stabilité et la prévention (1-3, 136).

Maximiser les effets...

La Figure 19 résume les 3 principaux points à surveiller dans le choix des exercices pour obtenir l'effet recherché, et évoqué avec la stratégie utilisée par la gymnaste pour se maintenir sur une poutre de 10 cm de large "sans effort". Tout part du bas. Le sol sur lequel repose le pied va conditionner le niveau d'instabilité. De là, il va y avoir une activation du muscle soleus puisque c'est le principal muscle à contrer l'effet de rotation du poids autour de cette articulation. S'il vient à être trop sollicité, alors les muscles

de la ceinture abdominale vont être sollicités pour stabiliser la hanche par une solidarisation du tronc et du bassin. Cette activation est dépendante de la tâche et de la vitesse du mouvement. Mais concernant le transversus adbominis, elle n'a pas de dominant de direction contrairement aux autres muscles comme le rectus abdominis qui est surtout sollicité selon un plan et un axe privilégié.



Figure 19 : Maximisation des effets sur le travail de stabilisation de l'équilibre par trois composantes.

Mais avant de maximiser les effets, il convient de travailler dans le sens inverse, c'est-à-dire d'adopter une stratégie "Top-Down" en commençant par introduire des variations de mouvements des membres supérieurs dont nous avons montré qu'ils influençaient sur la stabilité du tronc. Cela commencera déjà à mobiliser la ceinture abdominale.

Le travail en suspension est un travail intermédiaire entre l'instabilité du tronc et l'instabilité au niveau des appuis. Il existe depuis longtemps puisque nous l'utilisions déjà dans notre propre préparation physique en accrochant des anneaux sur une barre fixe. Ce travail commence d'ailleurs à faire l'objet d'investigations pour vérifier la véracité des propos marketing et/ou publicitaires qu'on peut lire sur les annonces vantant ces produits.

La première étude du genre s'est intéressée à la comparaison du travail en chaîne ouverte[35] et chaîne fermée avec un exercice standard et son équivalent en suspension : les muscles ciblés étaient les pectoraux et les

35 / Un exercice en chaîne cinétique ouverte se fait généralement avec la partie distale du segment mobile libre (développé couché) alors que, dans l'exercice en chaîne cinétique fermée, cette même partie est fixe (pompe).

ischio-jambiers (43). Des femmes ont suivi un entraînement consistant en 6 séries par semaine pendant 13 semaines. Seule la forme en chaîne fermée a été efficace confirmant ainsi les gains plus intéressants obtenus avec ce type de travail pour le bas du corps (14, 24, 54, 151).
De plus, une étude portant sur la vitesse de lancer en handball féminin a démontré l'efficacité de l'entraînement en suspension sur la stabilité centrale (ceinture lombo-abdominale) et sur le lancer (+5% environ), par les améliorations neuromusculaires qui s'ensuivirent. La durée était là aussi de 6 semaines en chaîne fermée (158).

... Mais éviter les mauvais côtés

La Figure 20 donne une vision globale des interactions quelquefois négatives qui peuvent exister entre les deux approches globale ou locale du renforcement musculaire selon les facteurs énumérés plus haut (figure 12).

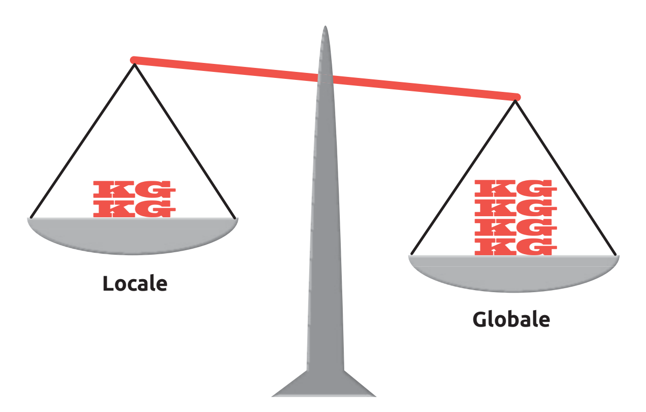


Figure 20 : Résumé des influences réciproques des deux formes de travail.

Des bénéfices peuvent être obtenus à condition de respecter quelques recommandations :

1 • Ne pas faire plus de 8 semaines consécutives ce type de travail en instabilité car la force et la puissance maximales commencent à diminuer de façon significative.

2 • Incorporer ces phases d'instabilité dans la planification pour mettre l'accent sur des phases du mouvement que vous souhaitez développer en priorité.
3 • Respecter le principe de spécificité de la discipline sportive quant aux choix d'exercices. Vérifier l'éventuelle existence d'un test qui serait justement spécifique.
4 • Éviter de faire l'évaluation en fin de séance pour que les différentes sources sensorielles ne soient pas affectées par l'état de fatigue lié à la séance elle-même.

5 • Affiner le testing

Lors des tests d'équilibre, il est fortement recommandé d'utiliser les 4 conditions suivantes en respectant bien l'ordre entre les deux premières sessions :

- support stable + yeux ouverts ;
- support stable + yeux fermés ;
- support instable + yeux ouverts ;
- support instable + yeux fermés.

Les temps de maintien de posture supérieurs à 3 minutes n'ont généralement aucune utilité sauf spécificité particulière. On pourra opter pour un travail en unipodale ou bipodale selon la spécialité sportive. La phase initiale évaluée de la sorte permettra de détecter les besoins du sportif.

6 • Conclusion

Résumé ci-dessous et en image… pour changer.

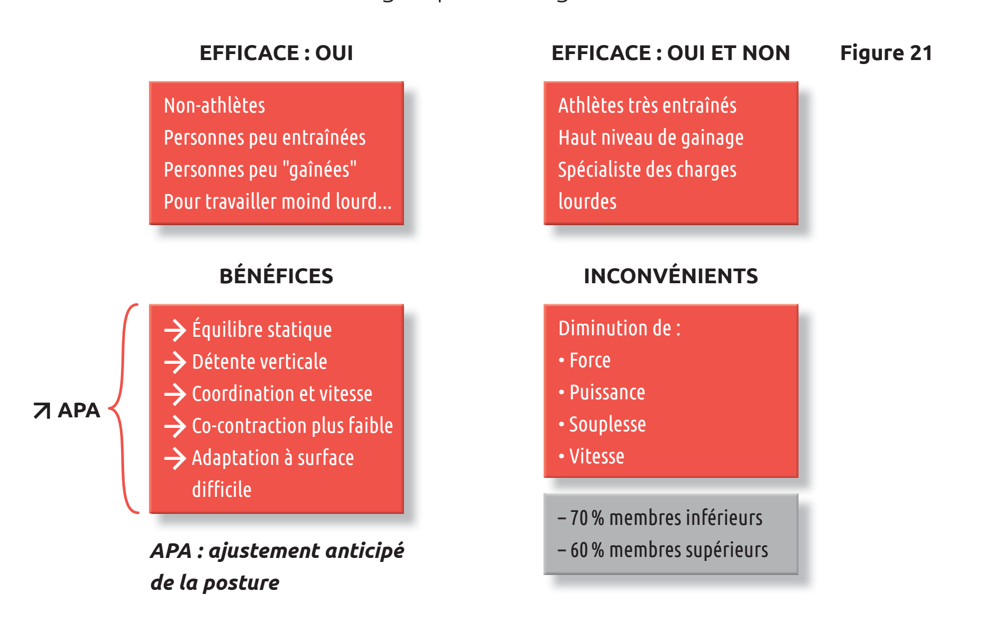


Figure 21

RECOMMANDATIONS POUR LES ATHLÈTES

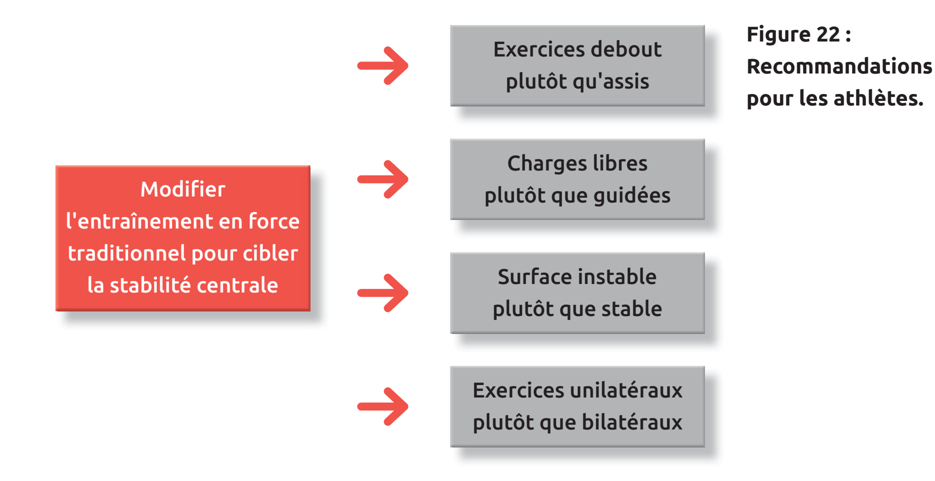


Figure 22 : Recommandations pour les athlètes.

Bibliographie

• 1 • Akuthota V, Ferreiro A, Moore T, and Fredericson M. Core stability exercise principles. Curr Sports Med Rep 7: 39-44, 2008.

• 2 • Akuthota V and Nadler SF. Core strengthening. Archives of physical medicine and rehabilitation 85: S86-92, 2004.

• 3 • Akuthota V, Standaert CJ, and Chimes GP. The role of core strengthening for chronic low back pain. PM & R : the journal of injury, function, and rehabilitation 3: 664-670, 2011.

• 4 • Alexandrov AV, Frolov AA, Horak FB, Carlson-Kuhta P, and Park S. Feedback equilibrium control during human standing. Biological cybernetics 93: 309-322, 2005.

• 5 • Alexandrov AV, Frolov AA, and Massion J. Biomechanical analysis of movement strategies in human forward trunk bending. I. Modeling. Biological cybernetics 84: 425-434, 2001.

• 6 • Alexandrov AV, Frolov AA, and Massion J. Biomechanical analysis of movement strategies in human forward trunk bending. II. Experimental study. Biological cybernetics 84: 435-443, 2001.

• 7 • Anderson K and Behm DG. The Impact of Instability Resistance Training on Balance and Stability. Sports Medicine 35: 43-53, 2005.

• 8 • Anderson K and Behm DG. Trunk muscle activity increases with unstable squat movements. Can J Appl Physiol 30: 33-45, 2005.

• 9 • Anderson KG and Behm DG. Maintenance of EMG activity and loss of force output with instability. J Strength Cond Res 18: 637-640, 2004.

• 10 • Appelberg B and Jeneskog T. Mesencephalic fusimotor control. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 15: 97-112, 1972.

• 11 • Applegate C, Gandevia SC, and Burke D. Changes in muscle and cutaneous cerebral potentials during standing. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 71: 183-188, 1988.

• 12 • Assaiante C. Development of locomotor balance control in healthy children. Neurosci BiobehavRev 22: 527-532, 1998.

• 13 • Assaiante C and Amblard B. Ontogenesis of head stabilization in space during locomotion in children: influence of visual cues. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 93: 499-515, 1993.

• 14 • Augustsson J, Esko A, Thomee R, and Svantesson U. Weight training of the thigh muscles using closed vs. open kinetic chain exercises: a comparison of performance enhancement. J Orthop Sports Phys Ther 27: 3-8, 1998.

• 15 • Behm DG, Drinkwater EJ, Willardson JM, and Cowley PM. Canadian Society for Exercise Physiology position stand: The use of instability to train the core in athletic and nonathletic conditioning. Appl Physiol Nutr Metab 35: 109-112, 2010.

• 16 • Bergmark A. Stability of the lumbar spine. A study in mechanical engineering. Acta orthopaedica Scandinavica Supplementum 230: 1-54, 1989.

• 17 • Berthoz A. Rôle de la proprioception dans le contrôle de la posture et du geste. Contribution dynamique de quelques récepteurs à la détection du mouvement, in: Du contrôle moteur à l'organisation du geste. H Hécaen, M Jeannerod, eds. Paris: Masson 1978, pp 187-224.

• 18 • Berthoz A. Le sens du mouvement. Place: Odile Jacob, 1997.

• 19 • Berthoz A. [Neural basis of spatial orientation and memory of routes: topokinetic memory or topokinesthesic memory]. Revue neurologique 157: 779-789, 2001.

• 20 • Berthoz A. La simplexité. Paris: Ed. Odile Jacob, 2009.

• 21 • Berthoz A, Israel I, Georges-Francois P, Grasso R, and Tsuzuku T. Spatial memory of body linear displacement: what is being stored? Science 269: 95-98, 1995.

• 22 • Berthoz A, Jeannerod M, Vital-Durand F, and Oliveras JL. [Is visual experience necessary for the maturation of vestibular control of eye movement]. Comptes rendus hebdomadaires des seances de l'Academie des sciences Serie D: Sciences naturelles 280: 1805-1808, 1975.

• 23 • Birznieks I, Macefield VG, Westling G, and Johansson RS. Slowly adapting mechanoreceptors in the borders of the human fingernail encode fingertip forces. The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience 29: 9370-9379, 2009.

• 24 • Blackburn JR and Morrissey MC. The relationship between open and closed kinetic chain strength of the lower limb and jumping performance. J Orthop Sports Phys Ther 27: 430-435, 1998.

• 25 • Blakemore SJ, Frith CD, and Wolpert DM. Spatio-temporal prediction modulates the perception of self-produced stimuli. Journal of cognitive neuroscience 11: 551-559, 1999.

• 26 • Blakemore SJ, Rees G, and Frith CD. How do we predict the consequences of our actions? A functional imaging study. Neuropsychologia 36: 521-529, 1998.

• 27 • Borghuis J, Hof AL, and Lemmink KAPM. The Importance of Sensory-Motor Control in Providing Core Stability: Implications for Measurement and Training. Sports Medicine 38: 893-916 810.2165/00007256-200838110-200800002, 2008.

• 28 • Bouisset S. Biomécanique et physiologie du mouvement. Paris: elsevier-Masson, 2002.

• 29 • Bouisset S and Do MC. Posture, dynamic stability, and voluntary movement. Neurophysiologie clinique = Clinical neurophysiology 38: 345-362, 2008.

• 30 • Bouisset S, Richardson J, and Zattara M. Do anticipatory postural adjustments occurring in different segments of the postural chain follow the same organisational rule for different task movement velocities, independently of the inertial load value? Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 132: 79-86, 2000.

• 31 • Breniere Y. How locomotor parameters adapt to gravity and body structure changes during gait development in children. Motor control 3: 186-204, 1999.

• 32 • Breniere Y and Bril B. [Why do children walk when falling down while adults fall down in walking?]. Comptes rendus de l'Academie des sciences Serie III, Sciences de la vie 307: 617-622, 1988.

• 33 • Breniere Y and Bril B. Development of postural control of gravity forces in children during the first 5 years of walking. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 121: 255-262, 1998.

• 34 • Brunia CH. The influence of a task on the Achilles tendon and Hoffmann reflex. Physiol Behav 6: 367-373, 1971.

• 35 • Buchanan JJ and Horak FB. Voluntary control of postural equilibrium patterns. Behavioural brain research 143: 121-140, 2003.

• 36 • Chong RK, Horak FB, Frank J, and Kaye J. Sensory organization for balance: specific deficits in Alzheimer's but not in Parkinson's disease. The journals of gerontology Series A, Biological sciences and medical sciences 54: M122-128, 1999.

• 37 • Chong RK, Horak FB, and Woollacott MH. Time-dependent influence of sensorimotor set on automatic responses in perturbed stance. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 124: 513-519, 1999.

• 38 • Clement G, Pozzo T, and Berthoz A. Contribution of eye positioning to control of the upside-down standing posture. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 73: 569-576, 1988.

• 39 • Comerford MJ and Mottram SL. Functional stability re-training: principles and strategies for managing mechanical dysfunction. Manual therapy 6: 3-14, 2001.

• 40 • Comerford MJ and Mottram SL. Movement and stability dysfunction--contemporary developments. Manual therapy 6: 15-26, 2001.

• 41 • Cowley PM, Swensen T, and Sforzo GA. Efficacy of instability resistance training. Int J Sports Med 28: 829-835, 2007.

• 42 • Cresswell AG, Blake PL, and Thorstensson A. The effect of an abdominal muscle training program on intra-abdominal pressure. Scandinavian journal of rehabilitation medicine 26: 79-86, 1994.

• 43 • Dannelly BD, Otey SC, Croy T, Harrison B, Rynders CA, Hertel JN, and Weltman A. The Effectiveness of Traditional and Sling Exercise Strength Training in Women. The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 464-471 410.1519/JSC.1510b1013e318202e318473, 2011.

• 44 • De Saedeleer C, Vidal M, Lipshits M, Bengoetxea A, Cebolla AM, Berthoz A, Cheron G, and McIntyre J. Weightlessness alters up/down asymmetries in the perception of self-motion. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale, 2013.

• 45 • Diener HC, Dichgans J, Guschlbauer B, and Bacher M. Role of visual and static vestibular influences on dynamic posture control. Human neurobiology 5: 105-113, 1986.

• 46 • Dietz V, Horstmann G, and Berger W. Involvement of different receptors in the regulation of human posture. Neuroscience letters 94: 82-87, 1988.

• 47 • Dietz V, Horstmann GA, and Berger W. Significance of proprioceptive mechanisms in the regulation of stance. Progress in brain research 80: 419-423; discussion 395-417, 1989.

• 48 • DiStefano LJ, Clark MA, and Padua DA. Evidence supporting balance training in healthy individuals: a systemic review. J Strength Cond Res 23: 2718-2731, 2009.

• 49 • DiStefano LJ, Padua DA, Blackburn JT, Garrett WE, Guskiewicz KM, and Marshall SW. Integrated Injury Prevention Program Improves Balance and Vertical Jump Height in Children. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 332-342 310.1519/JSC.1510b1013e3181cc2225, 2010.

• 50 • Dozza M, Chiari L, Peterka RJ, Wall C, and Horak FB. What is the most effective type of audio-biofeedback for postural motor learning? Gait & posture 34: 313-319, 2011.

• 51 • Drew T, Prentice S, and Schepens B. Cortical and brainstem control of locomotion. Progress in brain research 143: 251-261, 2004.

• 52 • Drinkwater EJ, Pritchett EJ, and Behm DG. Effect of instability and resistance on unintentional squat-lifting kinetics. Int J Sports Physiol Perform 2: 400-413, 2007.

• 53 • Dufosse M, Hugon M, and Massion J. Postural forearm changes induced by predictable in time or voluntary triggered unloading in man. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 60: 330-334, 1985.

• 54 • Ellenbecker TS and Davies GJ. Closed kinetic chain exercise. A comprehensive guide to multiple-joint exercise. Champaign (IL): Human Kinetics, 2001.

• 55 • Fitzpatrick RC, Gorman RB, Burke D, and Gandevia SC. Postural proprioceptive reflexes in standing human subjects: bandwidth of response and transmission characteristics. J Physiol 458: 69-83, 1992.

• 56 • Fowles JR. What I always wanted to know about instability training. Appl Physiol Nutr Metab 35: 89-90, 2010.

• 57 • Gandevia SC, McCloskey DI, and Burke D. Kinaesthetic signals and muscle contraction. Trends in neurosciences 15: 62-65, 1992.

• 58 • Gillies JD, Burke DJ, and Lance JW. Supraspinal control of tonic vibration reflex. Journal of neurophysiology 34: 302-309, 1971.

• 59 • Glasauer S, Amorim MA, Bloomberg JJ, Reschke MF, Peters BT, Smith SL, and Berthoz A. Spatial orientation during locomotion [correction of locomation] following space flight. Acta astronautica 36: 423-431, 1995.

• 60 • Glasauer S, Amorim MA, Vitte E, and Berthoz A. Goal-directed linear locomotion in normal and labyrinthine-defective subjects. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 98: 323-335, 1994.

• 61 • Gracovetsky S. An hypothesis for the role of the spine in human locomotion: a challenge to current thinking. Journal of biomedical engineering 7: 205-216, 1985.

• 62 • Gracovetsky S, Farfan H, and Helleur C. The abdominal mechanism. Spine 10: 317-324, 1985.

• 63 • Gracovetsky SA, Zeman V, and Carbone AR. Relationship between lordosis and the position of the centre of reaction of the spinal disc. Journal of biomedical engineering 9: 237-248, 1987.

• 64 • Grasso R, Assaiante C, Prevost P, and Berthoz A. Development of anticipatory orienting strategies during locomotor tasks in children. Neuroscience and biobehavioral reviews 22: 533-539, 1998.

• 65 • Grasso R, Glasauer S, Takei Y, and Berthoz A. The predictive brain: anticipatory control of head direction for the steering of locomotion. Neuroreport 7: 1170-1174, 1996.

• 66 • Grasso R, Ivanenko YP, McIntyre J, Viaud-Delmon I, and Berthoz A. Spatial, not temporal cues drive predictive orienting movements during navigation: a virtual reality study. Neuroreport 11: 775-778, 2000.

• 67 • Grasso R, Prevost P, Ivanenko YP, and Berthoz A. Eye-head coordination for the steering of locomotion in humans: an anticipatory synergy. Neuroscience letters 253: 115-118, 1998.

• 68 • Gurfinkel VS, Ivanenko Yu P, Levik Yu S, and Babakova IA. Kinesthetic reference for human orthograde posture. Neuroscience 68: 229-243, 1995.

• 69 • Harman EA, Frykman PN, Clagett ER, and Kraemer WJ. Intra-abdominal and intra-thoracic pressures during lifting and jumping. Med Sci Sports Exerc 20: 195-201, 1988.

• 70 • Henatsch HD and Langer HH. Basic neurophysiology of motor skills in sport: a review. Int J Sports Med 6: 2-14, 1985.

• 71 • Hodges PW, Cresswell AG, and Thorstensson A. Perturbed upper limb movements cause short-latency postural responses in trunk muscles. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 138: 243-250, 2001.

• 72 • Hodges PW, Cresswell AG, and Thorstensson A. Intra-abdominal pressure response to multidirectional support-surface translation. Gait & posture 20: 163-170, 2004.

• 73 • Hodges PW, Eriksson AE, Shirley D, and Gandevia SC. Intra-abdominal pressure increases stiffness of the lumbar spine. J Biomech 38: 1873-1880, 2005.

• 74 • Horak FB. Postural compensation for vestibular loss. Ann N Y Acad Sci 1164: 76-81, 2009.

• 75 • Horak FB. Postural compensation for vestibular loss and implications for rehabilitation. Restorative neurology and neuroscience 28: 57-68, 2010.

• 76 • Horak FB, Henry SM, and Shumway-Cook A. Postural perturbations: new insights for treatment of balance disorders. Physical therapy 77: 517-533, 1997.

• 77 • Horak FB and Hlavacka F. Somatosensory loss increases vestibulospinal sensitivity. Journal of neurophysiology 86: 575-585, 2001.

• 78 • Horak FB, Nutt JG, and Nashner LM. Postural inflexibility in parkinsonian subjects. Journal of the neurological sciences 111: 46-58, 1992.

• 79 • Horak FB and Woollacott M. Introduction to special issue on vestibular control of posture and gait. Journal of vestibular research : equilibrium & orientation 3: 1-2, 1993.

• 80 • Hugon M, Massion J, and Wiesendanger M. Anticipatory postural changes induced by active unloading and comparison with passive unloading in man. Pflugers Arch 393: 292-296, 1982.

• 81 • Israel I and Berthoz A. Contribution of the otoliths to the calculation of linear displacement. Journal of neurophysiology 62: 247-263, 1989.

• 82 • Israel I, Chapuis N, Glasauer S, Charade O, and Berthoz A. Estimation of passive horizontal linear whole-body displacement in humans. Journal of neurophysiology 70: 1270-1273, 1993.

• 83 • Israel I, Grasso R, Georges-Francois P, Tsuzuku T, and Berthoz A. Spatial memory and path integration studied by self-driven passive linear displacement. I. Basic properties. Journal of neurophysiology 77: 3180-3192, 1997.

• 84 • Israel I, Rivaud S, Berthoz A, and Pierrot-Deseilligny C. Cortical control of vestibular memory-guided saccades. Ann N Y Acad Sci 656: 472-484, 1992.

• 85 • Israel I, Siegler I, Rivaud-Pechoux S, Gaymard B, Leboucher P, Ehrette M, Berthoz A, Pierrot-Deseilligny C, and Flash T. Reproduction of self-rotation duration. Neuroscience letters 402: 244-248, 2006.

• 86 • Ivanenko Y, Grasso R, Israel I, and Berthoz A. Spatial orientation in humans: perception of angular whole-body displacements in two-dimensional trajectories. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 117: 419-427, 1997.

• 87 • Ivanenko YP, Cappellini G, Dominici N, Poppele RE, and Lacquaniti F. Coordination of locomotion with voluntary movements in humans. The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience 25: 7238-7253, 2005.

• 88 • Ivanenko YP, Dominici N, Cappellini G, and Lacquaniti F. Kinematics in newly walking toddlers does not depend upon postural stability. Journal of neurophysiology 94: 754-763, 2005.

• 89 • Ivanenko YP, Dominici N, Daprati E, Nico D, Cappellini G, and Lacquaniti F. Locomotor body scheme. Hum Mov Sci 30: 341-351, 2011.

• 90 • Ivanenko YP, Dominici N, and Lacquaniti F. Development of Independent Walking in Toddlers. Exercise and sport sciences reviews 35: 67-73 10.1249/JES.1240b1013e31803eafa31808, 2007.

• 91 • Ivanenko YP and Grasso R. Integration of somatosensory and vestibular inputs in perceiving the direction of passive whole-body motion. Brain research Cognitive brain research 5: 323-327, 1997.

• 92 • Ivanenko YP, Grasso R, and Lacquaniti F. Neck muscle vibration makes walking humans accelerate in the direction of gaze. J Physiol 525 Pt 3: 803-814, 2000.

• 93 • Ivanenko YP, Labini FS, Cappellini G, Macellari V, McIntyre J, and Lacquaniti F. Gait transitions in simulated reduced gravity. J Appl Physiol 110: 781-788, 2011.

• 94 • Ivanenko YP, Levik YS, Talis VL, and Gurfinkel VS. Human equilibrium on unstable support: the importance of feet-support interaction. Neuroscience letters 235: 109-112, 1997.

• 95 • Ivanenko YP, Solopova IA, and Levik YS. The direction of postural instability affects postural reactions to ankle muscle vibration in humans. Neuroscience letters 292: 103-106, 2000.

• 96 • Jacobs JV and Horak FB. Cortical control of postural responses. Journal of neural transmission (Vienna, Austria : 1996) 114: 1339-1348, 2007.

• 97 • Jeannerod M. Le cerveau volontaire. Paris: Ed. Odile Jacob, 2009.

• 98 • Jeannerod M. La Fabrique des idées Paris: Ed. Odile Jacob, 2011.

• 99 • Johansson RS, Vallbo AB, and Westling G. Thresholds of mechanosensitive afferents in the human hand as measured with von Frey hairs. Brain research 184: 343-351, 1980.

• 100 • Johansson RS and Westling G. Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 56: 550-564, 1984.

• 101 • Johansson RS and Westling G. Significance of cutaneous input for precise hand movements. Electroencephalography and clinical neurophysiology Supplement 39: 53-57, 1987.

• 102 • Kibler WB, Press J, and Sciascia A. The Role of Core Stability in Athletic Function. Sports Medicine 36: 189-198, 2006.

• 103 • Labini FS, Meli A, Ivanenko YP, and Tufarelli D. Recurrence quantification analysis of gait in normal and hypovestibular subjects. Gait & posture 35: 48-55, 2012.

• 104 • Lacquaniti F, Carrozzo M, and Borghese NA. The role of vision in tuning anticipatory motor responses of the limbs, in: Multisensory control of movement. A Berthoz, ed. Oxford: Oxford University Press, 1993, pp 381-393.

• 105 • Lacquaniti F, Ivanenko YP, and Zago M. Kinematic control of walking. Archives italiennes de biologie 140: 263-272, 2002.

• 106 • Lacquaniti F and Maioli C. Adaptation to suppression of visual information during catching. The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience 9: 149-159, 1989.

• 107 • Lacquaniti F and Maioli C. The role of preparation in tuning anticipatory and reflex responses during catching. The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience 9: 134-148, 1989.

• 108 • Lance JW and Burke D. Mechanisms of spasticity. Archives of physical medicine and rehabilitation 55: 332-337, 1974.

• 109 • Le Bozec S and Bouisset S. Does postural chain mobility influence muscular control in sitting ramp pushes? Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 158: 427-437, 2004.

• 110 • Le Bozec S and Bouisset S. Contribution of seat and foot reaction forces to anticipatory postural adjustments (APAs) in sitting isometric ramp pushes. Gait & posture 30: 282-287, 2009.

• 111 • Ledebt A, Bril B, and Breniere Y. The build-up of anticipatory behaviour. An analysis of the development of gait initiation in children. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 120: 9-17, 1998.

• 112 • Leuenberger UA, Mostoufi-Moab S, Herr M, Gray K, Kunselman A, and Sinoway LI. Control of skin sympathetic nerve activity during intermittent static handgrip exercise. Circulation 108: 2329-2335, 2003.

• 113 • Lin SI and Woollacott MH. Postural muscle responses following changing balance threats in young, stable older, and unstable older adults. Journal of motor behavior 34: 37-44, 2002.

• 114 • Lingenhohl K and Friauf E. Sensory neurons and motoneurons of the jaw-closing reflex pathway in rats: a combined morphological and physiological study using the intracellular horseradish peroxidase technique. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 83: 385-396, 1991.

• 115 • Lipshits M, McIntyre J, Zaoui M, Gurfinkel V, and Berthoz A. Does gravity play an essential role in the asymmetrical visual perception of vertical and horizontal line length? Acta astronautica 49: 123-130, 2001.

• 116 • Lobel E, Kleine JF, Leroy-Willig A, Van de Moortele PF, Le Bihan D, Grusser OJ, and Berthoz A. Cortical areas activated by bilateral galvanic vestibular stimulation. Ann N Y Acad Sci 871: 313-323, 1999.

• 117 • Maior AS, Simao R, Freitas de Salles B, Miranda H, and Costa PB. Neuromuscular activity during the squat exercise on unstable platform. Braz J Biomot 3: 121-129, 2009.

• 118 • Mancini M, Carlson-Kuhta P, Zampieri C, Nutt JG, Chiari L, and Horak FB. Postural sway as a marker of progression in Parkinson's disease: a pilot longitudinal study. Gait & posture 36: 471-476, 2012.

• 119 • Masse-Alarie H, Flamand VH, Moffet H, and Schneider C. Corticomotor control of deep abdominal muscles in chronic low back pain and anticipatory postural adjustments. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 218: 99-109, 2012.

• 120 • Massion J. Postural control system. Current opinion in neurobiology 4: 877-887, 1994.

• 121 • Massion J. Cerveau et motricité. Paris: PUF, 1997.

• 122 • Massion J. Postural control systems in developmental perspective. Neuroscience and biobehavioral reviews 22: 465-472, 1998.

• 123 • Massion J, Alexandrov A, and Frolov A. Why and how are posture and movement coordinated? Progress in brain research 143: 13-27, 2004.

• 124 • McCrea RA, Yoshida K, Berthoz A, and Baker R. Eye movement related activity and morphology of second order vestibular neurons terminating in the cat abducens nucleus. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 40: 468-473, 1980.

• 125 • McIntyre J, Berthoz A, and Lacquaniti F. Reference frames and internal models for visuo-manual coordination: what can we learn from microgravity experiments? Brain research Brain research reviews 28: 143-154, 1998.

• 126 • McIntyre J, Lipshits M, Zaoui M, Berthoz A, and Gurfinkel V. Internal reference frames for representation and storage of visual information: the role of gravity. Acta astronautica 49: 111-121, 2001.

• 127 • McIntyre J, Zago M, Berthoz A, and Lacquaniti F. Does the brain model Newton's laws? Nature neuroscience 4: 693-694, 2001.

• 128 • Mettler FA. Muscular tone and movement: their cerebral control in primates. Neurosciences research 1: 175-250, 1968.

• 129 • Moberg E. The role of cutaneous afferents in position sense, kinaesthesia, and motor function of the hand. Brain : a journal of neurology 106 (Pt 1): 1-19, 1983.

• 130 • Mouchnino L, Cincera M, Fabre JC, Assaiante C, Amblard B, Pedotti A, and Massion J. Is the regulation of the center of mass maintained during leg movement under microgravity conditions? Journal of neurophysiology 76: 1212-1223, 1996.

• 131 • Newman NM and Gracovetsky SA. Flexion-relaxation phenomenon (transfer of loads between lumbar tissues during the flexion-relaxation phenomenon). Spine 20: 1739-1740, 1995.

• 132 • Norwood JT, Anderson GS, Gaetz MB, and Twist PW. Electromyographic activity of the trunk stabilizers during stable and unstable bench press. J Strength Cond Res 21: 343-347, 2007.

• 133 • Nouillot P, Bouisset S, and Do MC. Do fast voluntary movements necessitate anticipatory postural adjustments even if equilibrium is unstable? Neuroscience letters 147: 1-4, 1992.

• 134 • Nouillot P, Do MC, and Bouisset S. Are there anticipatory segmental adjustments associated with lower limb flexions when balance is poor in humans? Neuroscience letters 279: 77-80, 2000.

• 135 • O'Mara SM, Rolls ET, Berthoz A, and Kesner RP. Neurons responding to whole-body motion in the primate hippocampus. The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience 14: 6511-6523, 1994.

• 136 • Oliver GD, Dwelly PM, Sarantis ND, Helmer RA, and Bonacci JA. Muscle Activation of Different Core Exercises. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 3069-3074 3010.1519/JSC.3060b3013e3181d3321da, 2010.

• 137 • Paillard J. Tonus, posture et motricité téléocinétique, in: Traité de Physiologie. C Keayser, ed. Paris: Flaamarion, 1976, pp 521-728.

• 138 • Paillard J. The functional labelling of neural codes, in: Neural coding of motor performance. J Massion, J Paillard, W Schultz, M Weisendanger, eds. Berlin: Verlag, 1983, pp 1-19.

• 139 • Paulignan Y, Dufosse M, Hugon M, and Massion J. Acquisition of co-ordination between posture and movement in a bimanual task. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 77: 337-348, 1989.

• 140 • Pierrot-Deseilligny C, Israel I, Berthoz A, Rivaud S, and Gaymard B. Role of the different frontal lobe areas in the control of the horizontal component of memory-guided saccades in man. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 95: 166-171, 1993.

• 141 • Pizzera A. Gymnastic judges benefit from their own motor experience as gymnasts. Res Q Exerc Sport 83: 603-607, 2012.

• 142 • Pompeiano O. Spinovestibular relations: anatomical and physiological aspects. Progress in brain research 37: 263-296, 1972.

• 143 • Pozzo T, Berthoz A, and Lefort L. Head kinematic during various motor tasks in humans. Progress in brain research 80: 377-383; discussion 373-375, 1989.

• 144 • Pozzo T, Berthoz A, and Lefort L. Head stabilization during various locomotor tasks in humans. I. Normal subjects. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 82: 97-106, 1990.

• 145 • Pozzo T, Berthoz A, Lefort L, and Vitte E. Head stabilization during various locomotor tasks in humans. II. Patients with bilateral peripheral vestibular deficits. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 85: 208-217, 1991.

• 146 • Pozzo T, Berthoz A, Vitte E, and Lefort L. Head stabilization during locomotion. Perturbations induced by vestibular disorders. Acta oto-laryngologica Supplementum 481: 322-327, 1991.

• 147 • Pozzo T, Levik Y, and Berthoz A. Head and trunk movements in the frontal plane during complex dynamic equilibrium tasks in humans. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 106: 327-338, 1995.

• 148 • Pozzo T, Papaxanthis C, Stapley P, and Berthoz A. The sensorimotor and cognitive integration of gravity. Brain research Brain research reviews 28: 92-101, 1998.

• 149 • Prevost P, Ivanenko Y, Grasso R, and Berthoz A. Spatial invariance in anticipatory orienting behaviour during human navigation. Neuroscience letters 339: 243-247, 2003.

• 150 • Prochazka A. Sensorimotor gain control: a basic strategy of motor systems? Progress in neurobiology 33: 281-307, 1989.

• 151 • Prokopy MP, Ingersoll CD, Nordenschild E, Katch FI, Gaesser GA, and Weltman A. Closed-Kinetic Chain Upper-Body Training Improves Throwing Performance of NCAA Division I Softball Players. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 1790-1798 1710.1519/JSC.1790b1013e318185f318637, 2008.

• 152 • Rab GT, Chao EY, and Stauffer RN. Muscle force analysis of the lumbar spine. The Orthopedic clinics of North America 8: 193-199, 1977.

• 153 • Roll JP, Popov K, Gurfinkel V, Lipshits M, Andre-Deshays C, Gilhodes JC, and Quoniam C. Sensorimotor and perceptual function of muscle proprioception in microgravity. Journal of vestibular research : equilibrium & orientation 3: 259-273, 1993.

• 154 • Saeterbakken AH and Fimland MS. Muscle activity of the core during bilateral, unilateral, seated and standing resistance exercise. Eur J Appl Physiol 112: 1671-1678, 2012.

• 155 • Saeterbakken AH and Fimland MS. Effects of body position and loading modality on muscle activity and strength in shoulder presses. The Journal of Strength & Conditioning Research Publish Ahead of Print: 10.1519/JSC.1510b1013e318276b318873, 2013.

• 156 • Saeterbakken AH and Fimland MS. Electromyographic activity and 6-RM strength in bench press on stable and unstable surfaces. The Journal of Strength & Conditioning Research Publish Ahead of Print: 10.1519/JSC.1510b1013e3182606d3182603d, 2013.

• 157 • Saeterbakken AH and Fimland MS. Muscle Force Output and Electromyographic Activity in Squats With Various Unstable Surfaces. The Journal of Strength & Conditioning Research 27: 130-136 110.1519/JSC.1510b1013e3182541d3182543, 2013.

• 158 • Saeterbakken AH, van den Tillaar R, and Seiler S. Effect of Core Stability Training on Throwing Velocity in Female Handball Players. The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 712-718 710.1519/JSC.1510b1013e3181cc1227e, 2011.

• 159 • Sale DG. Postactivation Potentiation: Role in Human Performance. Exercise and sport sciences reviews 30: 138-143, 2002.

• 160 • Sale DG, Upton AR, McComas AJ, and MacDougall JD. Neuromuscular function in weight-trainers. Experimental neurology 82: 521-531, 1983.

• 161 • Savelsbergh GJ and van der Kamp J. The effect of body orientation to gravity on early infant reaching. Journal of experimental child psychology 58: 510-528, 1994.

• 162 • Schepens B and Drew T. Independent and convergent signals from the pontomedullary reticular formation contribute to the control of posture and movement during reaching in the cat. Journal of neurophysiology 92: 2217-2238, 2004.

• 163 • Schepens B, Stapley P, and Drew T. Neurons in the pontomedullary reticular formation signal posture and movement both as an integrated behavior and independently. Journal of neurophysiology 100: 2235-2253, 2008.

• 164 • Scivoletto G, Ivanenko Y, Morganti B, Grasso R, Zago M, Lacquaniti F, Ditunno J, and Molinari M. Plasticity of spinal centers in spinal cord injury patients: new concepts for gait evaluation and training. Neurorehabilitation and neural repair 21: 358-365, 2007.

• 165 • Selionov VA, Solopova IA, Zhvansky DS, Karabanov AV, Chernikova LA, Gurfinkel VS, and Ivanenko YP. Lack of non-voluntary stepping responses in Parkinson's disease. Neuroscience, 2013.

• 166 • Senot P, Prevost P, and McIntyre J. Estimating time to contact and impact velocity when catching an accelerating object with the hand. Journal of experimental psychology Human perception and performance 29: 219-237, 2003.

• 167 • Senot P, Zago M, Le Seac'h A, Zaoui M, Berthoz A, Lacquaniti F, and McIntyre J. When up is down in 0g: how gravity sensing affects the timing of interceptive actions. The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience 32: 1969-1973, 2012.

• 168 • Shambes GM. Influence of the muscle spindle on posture and movement. Physical therapy 48: 1094-1102, 1968.

• 169 • Shupert CL and Horak FB. Effects of vestibular loss on head stabilization in response to head and body perturbations. Journal of vestibular research : equilibrium & orientation 6: 423-437, 1996.

• 170 • Shupert CL, Horak FB, and Black FO. Hip sway associated with vestibulopathy. Journal of vestibular research : equilibrium & orientation 4: 231-244, 1994.

• 171 • Stapley P, Pozzo T, and Grishin A. The role of anticipatory postural adjustments during whole body forward reaching movements. Neuroreport 9: 395-401, 1998.

• 172 • Stapley PJ, Pozzo T, Cheron G, and Grishin A. Does the coordination between posture and movement during human whole-body reaching ensure center of mass stabilization? Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 129: 134-146, 1999.

• 173 • Stokes IA and Gardner-Morse MG. Strategies used to stabilize the elbow joint challenged by inverted pendulum loading. J Biomech 33: 737-743, 2000.

• 174 • SZYMANSKI DJ, MCINTYRE JS, SZYMANSKI JM, BRADFORD TJ, SCHADE RL, MADSEN NH, and PASCOE DD. Effect of Torso Rotational Strength on Angular Hip, Angular Shoulder, and Linear Bat Velocities of High School Baseball Players. The Journal of Strength & Conditioning Research 21: 1117-1125, 2007.

• 175 • Szymanski DJ, Szymanski JM, Schade RL, Bradford TJ, McIntyre JS, DeRenne C, and Madsen NH. The Relation Between Anthropometric and Physiological variables and Bat Velocity of High-School Baseball Players Before and After 12 Weeks of Training. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 2933-2943 2910.1519/JSC.2930b2013e3181f2930a2976a, 2010.

• 176 • Toffin D, McIntyre J, Droulez J, Kemeny A, and Berthoz A. Perception and reproduction of force direction in the horizontal plane. Journal of neurophysiology 90: 3040-3053, 2003.

• 177 • Tolambiya A, Chiovetto E, Pozzo T, and Thomas E. Modulation of anticipatory postural activity for multiple conditions of a whole-body pointing task. Neuroscience 210: 179-190, 2012.

• 178 • van Keeken HG, Vrieling AH, Hof AL, Halbertsma JP, Schoppen T, Postema K, and Otten B. Controlling propulsive forces in gait initiation in transfemoral amputees. Journal of biomechanical engineering 130: 011002, 2008.

• 179 • Vera-Garcia FJ, Elvira JL, Brown SH, and McGill SM. Effects of abdominal stabilization maneuvers on the control of spine motion and stability against sudden trunk perturbations. J Electromyogr Kinesiol 17: 556-567, 2007.

• 180 • Vera-Garcia FJ, Grenier SG, and McGill SM. Abdominal muscle response during curl-ups on both stable and labile surfaces. Physical therapy 80: 564-569, 2000.

• 181 • Vernazza S, Cincera M, Pedotti A, and Massion J. Balance control during lateral arm raising in humans. Neuroreport 7: 1543-1548, 1996.

• 182 • Viaud-Delmon I, Siegler I, Israel I, Jouvent R, and Berthoz A. Eye deviation during rotation in darkness in trait anxiety: an early expression of perceptual avoidance? Biological psychiatry 47: 112-118, 2000.

• 183 • Vidal M, Amorim MA, McIntyre J, and Berthoz A. The perception of visually presented yaw and pitch turns: assessing the contribution of motion, static, and cognitive cues. Perception & psychophysics 68: 1338-1350, 2006.

• 184 • Vidal M, Lipshits M, McIntyre J, and Berthoz A. Gravity and spatial orientation in virtual 3D-mazes. Journal of vestibular research : equilibrium & orientation 13: 273-286, 2003.

• 185 • Vital-Durand F and Jeannerod M. Maturation of the optokinetic response: genetic and environmental factors. Brain research 71: 249-257, 1974.

• 186 • Vitte E, Derosier C, Caritu Y, Berthoz A, Hasboun D, and Soulie D. Activation of the hippocampal formation by vestibular stimulation: a functional magnetic resonance imaging study. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 112: 523-526, 1996.

• 187 • Wahl MJ and Behm DG. Not All Instability Training Devices Enhance Muscle Activation in Highly Resistance-Trained Individuals. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 1360-1370 1310.1519/JSC.1360b1013e318175ca318173c, 2008.

• 188 • Westling G and Johansson RS. Factors influencing the force control during precision grip. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 53: 277-284, 1984.

• 189 • Westling G and Johansson RS. Responses in glabrous skin mechanoreceptors during precision grip in humans. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 66: 128-140, 1987.

• 190 • Willardson JM. Core stability training: applications to sports conditioning programs. J Strength Cond Res 21: 979-985, 2007.

• 191 • Winter DA, Patla AE, Prince F, Ishac M, and Gielo-Perczak K. Stiffness control of balance in quiet standing. Journal of neurophysiology 80: 1211-1221, 1998.

• 192 • Wright WG, Ivanenko YP, and Gurfinkel VS. Foot anatomy specialization for postural sensation and control. Journal of neurophysiology 107: 1513-1521, 2012.

• 193 • Xi MC, Morales FR, and Chase MH. A GABAergic pontine reticular system is involved in the control of wakefulness and sleep. Sleep research online : SRO 2: 43-48, 1999.

• 194 • Xi MC, Morales FR, and Chase MH. The motor inhibitory system operating during active sleep is tonically suppressed by GABAergic mechanisms during other states. Journal of neurophysiology 86: 1908-1915, 2001.

• 195 • Yates BJ, Billig I, Cotter LA, Mori RL, and Card JP. Role of the vestibular system in regulating respiratory muscle activity during movement. Clinical and experimental pharmacology & physiology 29: 112-117, 2002.

• 196 • Zemková E, Jelen M, Kovácioková Z, Ollé G, Vilman T, and Hamar D. Power Outputs in the Concentric Phase of Resistance Exercises Performed in the Interval Mode on Stable and Unstable Surfaces. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 3230-3236 3210.1519/JSC.3230b3013e31824bc31197, 2012.

12

Comment développer un gainage fonctionnel ?

Sommaire

1 • Apports de connaissances 529

Introduction 529
Le gainage, une définition 536

2 • S'entraîner ! 545

Mise en œuvre 545
Les exercices et outils à disposition 546
Trois exemples d'études pour appuyer nos dires 546
Point clés 548

Bibliographie 550

Nous conseillons fortement la lecture du chapitre 11 sur l'équilibre en complément de celui-ci.

1 • Apports de connaissances

Introduction

Avant de définir le gainage, il faut comprendre que la région du dos et surtout lombaire est particulièrement touchée par des douleurs invalidantes (deuxième cause d'invalidité en France). Les sportifs ne sont pas épargnés, le rugby inflige de nombreuses contraintes sur le rachis, les sports de combat, le vélo... Nous allons redonner un contexte au mal du siècle par un apport de connaissances puis proposer nos stratégies.

Contexte des douleurs de type dorsalgie et particulièrement lombaire.

Sportif qui souffrez du dos, lorsque vous allez chez votre médecin et qu'il vous laisse repartir en expliquant que vous avez une lombalgie, demandez-lui des précisions. Vous saviez déjà que vous aviez mal dans la région du bas du dos. Ce que vous vouliez savoir en allant chez votre spécialiste de la santé, c'est les raisons de cette douleur.

- Est-ce une lésion à un muscle ?
- Est-ce une dégénérescence discale ?
- Est-ce une hernie discale ? (Parler d'entorse discale est plus correct)
- De l'arthrose, de l'arthrite, de l'ostéoporose, un phénomène inflammatoire ?

Il ne peut pas sans examen complémentaire être certain de son diagnostic, soyez très prudent lorsque vous avez ce type de douleur et que vous n'en connaissez pas l'origine. Insistez, c'est votre droit !
En qualité de sportif ou d'entraîneur, il y a des signes qui doivent vous éclairer dans votre prise de décision. Quand dois-je consulter ?

- La douleur dure plus de 3 jours.
- Les douleurs restent présentes la nuit, elles vous gênent dans votre sommeil.

- Douleur qui s'étend à la cuisse, il semble possible qu'un nerf (souvent le sciatique) soit en contrainte ou stimulé par une inflammation. C'est un cercle vicieux, puisque parfois le muscle piriforme (anciennement appelé pyramidale) se trouve en contraction et ajoute de la douleur.
- Des engourdissements aux membres inférieurs apparaissent.
- Une perte de poids (atrophie musculaire) que l'on ne comprend pas survient, cumulée à cette douleur.
- Cette douleur est conséquente à une chute ou un traumatisme (Figure 1).

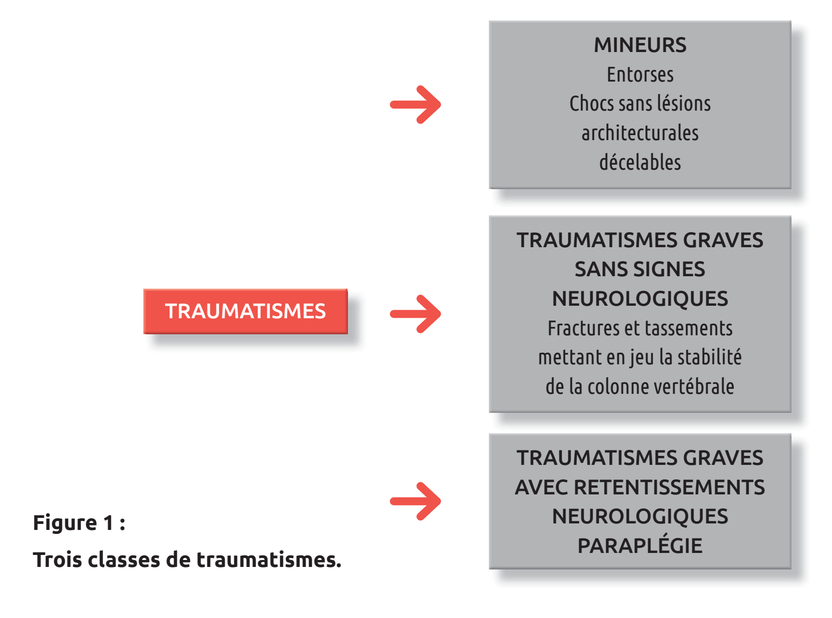


Figure 1 :
Trois classes de traumatismes.

Initialement, il existe des personnes à risques et des sports à risques (nous en avons déjà cités) :

- Les femmes enceintes du fait d'une surcharge pondérale et d'une modification de leur centre de gravité.
- Les travailleurs avec ports de charges lourdes, cumulés à un sport mobilisant fortement le rachis ; il devient probable de se faire mal (contrainte plus contrainte).
- Une mauvaise posture alors que le dos est fragilisé.

Des facteurs s'additionnent comme le manque d'activité physique, le surpoids, des talons hauts qui mobilisent la chaîne postérieure toute la journée, le tabagisme (qui accentue l'ostéoporose).
Si la douleur est présente, une prise en charge par un staff médical compétent est nécessaire, mais la reprise de l'activité doit être prudente, nous verrons des solutions plus loin dans le chapitre.

Un rappel anatomique pour mieux comprendre

Le rachis supporte la cage thoracique, le tout fusionné représente 33 vertèbres, 24 côtes, un sternum, 23 disques, 14 cartilages osseux, 120 articulations (72 vertébrales et 48 costo-vertébrales. C'est ce que l'on nomme un ensemble complexe mais il permet la grâce et la finesse de la danse, de la gymnastique et de bien d'autres disciplines.
La colonne vertébrale possède 4 courbures pour harmoniser les 7 cervicales, les 12 thoraciques, les 5 lombaires et le complexe sacrum coccyx :

- la lordose cervicale ;
- la cyphose thoracique ;
- la lordose dorsale ;
- la cyphose sacrale.

Bien garder en tête cette réalité : 3 à 7 % de la population possèdent 6 à 8 vertèbres lombaires et 3 à 7 % de la population disposent de 3 à 4 vertèbres lombaires. Au niveau des cervicales, les mammifères ont en commun les 7 cervicales, même celui qui possède le plus long cou de la savane !
La colonne vertébrale (CV) est à la fois ***stable et mobile***, une belle invention de Mère Nature afin de nous mouvoir et protéger l'autoroute de l'information qu'est la moelle épinière. Elle fait interagir 3 sous-systèmes.

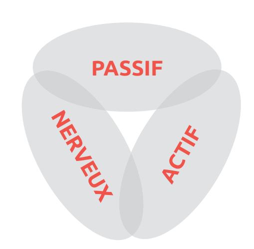


**Figure 2 :
Les 3 sous-systèmes impliqués dans la stabilisation de la colonne vertébrale.
D'après Panjabi (34).**

Éléments passifs

Mobile parce que les disques intervertébraux ont une structure qui fait penser à celle des planches d'équilibre utilisées pour la rééducation ou les circassiens qui font des prouesses incroyables dessus. Elles sont composées d'une demi-sphère sur laquelle repose un plateau. Imaginez que vous mettiez un pneu autour de la demi-sphère et dessous un nouveau plateau, et vous aurez un modèle très simpliste du disque : à la fois rigide et souple, à la fois résistant à la compression mais capable de se déformer pour mieux encaisser les contraintes.

Stable grâce à des éléments passifs et actifs. Les éléments passifs sont de grandes structures ligamentaires organisées soit en bandes et qui parcourent la CV de vertèbre en vertèbre, soit en petites structures qui s'attachent entre les vertèbres adjacentes. Un exemple de grande structure : les ligaments longitudinaux antérieur et postérieur en avant et en arrière des corps vertébraux ; et pour les petites structures : les ligaments inter-épineux et sus-épineux au niveau des apophyses épineuses des vertèbres. Ces ligaments sont complétés par les structures osseuses qui limitent les mouvements de par leur forme en arrière et latéralement. Au milieu des scapulas et sur la partie lombaire, de grandes bandes de tissus conjonctifs maintiennent un niveau de force par une augmentation de la raideur locale. Ces "losanges aponévrotiques" forment des résistances aux caissons abdominal et thoracique.

Éléments actifs

Cependant, la configuration osseuse et ligamentaire de la CV ne peut supporter qu'une charge très faible (environ 10 kg) qui est bien en deçà du poids corporel. D'où l'importance des éléments actifs que sont les muscles pour aider à la consolider, la stabiliser, la protéger (27).

La "rigidité" postérieure de la CV est due à l'ensemble musculaire composé de muscles plats (contrairement aux muscles des membres inférieurs et supérieurs qui sont ronds) qui forment des triangles de force.

Connaissez-vous les fameux muscles du dos ? Ils sont nombreux et le tableau ci-après les résume, mais les véritables muscles du gainage sont ceux qui sont improprement appelés les muscles lombaires ou les spinaux alors qu'il s'agit des **érecteurs des rachis.**

Il existe 3 plans ou 3 couches de muscles.

PLAN SUPERFICIEL	
MUSCLES	**RÔLES**
Grand dorsal	Extenseur du bras, rotateur médial
Trapèze	Élève l'épaule, extenseur des cervicales, incline la tête, adducteur de la scapula
PLAN MOYEN	
Dentelé postérieur supérieur	Soulève les côtes
Dentelé postérieur inférieur	Abaisse les côtes
Plan profond (couche superficielle)	
Iliocostal	Rotateur et érecteur
Muscle spinal	Incline la colonne et érecteur
Longissimus	Érecteur et incline la colonne
Plan profond (couche profonde)	
Muscles intertransversaires	Inclinent ou stabilisent
Muscles interépineux	Érecteurs
Muscles transversaires épineux	Ensemble de 3 muscles cités ci-dessous
Muscles rotateurs	Rotateurs côté opposé et érecteur
Muscles semi-spinaux	Rotateurs côté opposé et érecteurs
Muscles multifides	Rotateurs et érecteurs

Et pour équilibrer les forces, qu'avons-nous devant ?

DES COUCHES SUPERFICIELLES AUX COUCHES LES PLUS PROFONDES	
La croyance est d'imaginer que sous la peau se trouvent les tablettes de chocolat, il n'en est rien. La peau dépecée, il existe du tissu conjonctif spécialisé (le tissu adipeux), puis des fascias et enfin les aponévroses des obliques passant au-dessus du grand droit de l'abdomen (tablette de chocolat). Le transverse est également par-dessus le grand droit par son aponévrose mais seulement dans la partie inférieure de l'abdomen.	
MUSCLES	**RÔLES**
Partie supérieure de la sangle abdominale	
Oblique externe	Incline et effectue la rotation en même temps, fléchisseur du tronc et aussi la compression des viscères.
Oblique interne	Incline le buste, flexion du tronc
Grand droit de l'abdomen	Fléchisseur du tronc, abaisse les côtes
Transverse	Compresse les viscères (se nomme la presse abdominale)
Partie inférieure de la sangle abdominale	
Oblique externe puis l'oblique interne, le transverse et enfin le grand droit de l'abdomen	

Nous ne citerons pas le pyramidal qui peut faire défaut chez 15 % des personnes. Il s'attache sur la bande du grand droit de l'abdomen.

Bergmark (8) a proposé une organisation de ces muscles en fonction de leur rôle principal dans la stabilisation de la CV :

- groupes "globaux" composés de grands muscles superficiels ayant pour fonction de transférer les forces entre la cage thoracique et le bassin et provoquant une augmentation de la pression intra-abdominale, comme les droits de l'abdomen, les obliques internes et externes, le transverse de l'abdomen, l'érecteur du rachis, la portion latérale du carré des lombes ;
- groupes "locaux" composés de petits muscles profonds contrôlant les mouvements intersegmentaires de la colonne, c'est-à-dire les mouvements entre les vertèbres adjacentes, comme par exemple les multifides, les rotateurs, les semi-spinaux, les interépineux.

Leur action peut être tout aussi bien active (par contraction) que passive (par allongement passif) de sorte que leur mobilisation met en tension la colonne vertébrale selon des mécanismes décrits par certains auteurs via le concept de "tenségrité", concept cité dans le chapitre sur la souplesse et qui prend tout son sens ici (18-20).

Éléments nerveux

Le tableau ne serait pas complet sans évoquer le système nerveux qui agit involontairement (excitation spinale des muscles) ou volontairement (excitation supra-spinale des muscles) ou encore via la douleur ou des réactions de type sympathique. On intègre dans ce sous-système l'ensemble des capteurs musculaires, tendineux, capsulaires, ligamentaires, peauciers. Les besoins en termes de stabilité de la CV peuvent changer instantanément en fonction des forces externes qui s'appliquent à la fois par rapport à la posture que l'on souhaite tenir ou à celle qu'on voudrait obtenir à la fin du mouvement. Mais il a été découvert également que les relations intersegmentaires pouvaient avoir une influence elles aussi dans cette régulation

comme cela est évoqué dans le chapitre sur l'équilibre. Historiquement, les plus récents capteurs à avoir été ajoutés dans cette longue liste sont les capteurs de la gravité situés dans le tronc (28-32), hypothèse qui a ensuite été confortée par les travaux réalisés avec des astronautes en apesanteur (28-32). Cela démontre que le cerveau utilise indifféremment des informations externes ou internes (on parle de fusion multisensorielle) pour gérer les mouvements et que des grandeurs physiques, comme la gravité, ou plutôt son action sur notre corps et sur le monde extérieur, sont intégrées très tôt dans le développement comme variables du mouvement (11, 12), faisant de certaines parties du cerveau des zones privilégiées dans le contrôle de notre posture en relation avec la gravité (9, 21).

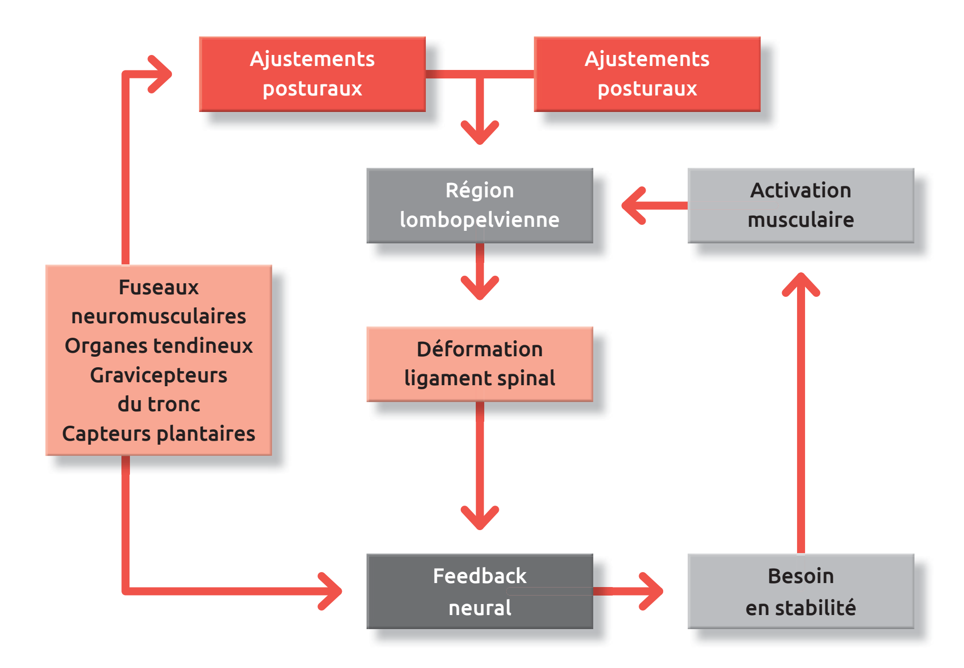


Figure 3 : D'après Willarson (2007) modifée par Pascal PREVOST.

Quelle faiblesse redoutée de la CV est présente dans les esprits ?

Hernie discale, L4-L5, cruralgie, sciatique, douleurs lombaires, voici des termes qui, lâchés par une personne en souffrance, traduisent un phénomène pourtant mal compris.

Chaque vertèbre mobile possède un espace amortissant que l'on nomme le disque intervertébral, composé d'un contour nommé anneau fibreux (annulus fibrosus) et d'un noyau pulpeux (nucleus pulposus). Les contraintes répétées ou le manque de force des muscles ceinturant la CV peuvent provoquer une fissure de l'anneau, laissant s'écouler du liquide, ou pire, laissant sortir le noyau.

Application pour le sportif

Snook et coll. ont démontré que la flexion lombaire du matin étant une des raisons des douleurs lombaires chroniques, il fallait conserver sa cambrure (lordose) naturelle possible les premières heures après le lever.
Nous allons plus loin : durant des stages matinaux, pensez à mobiliser la CV en guise d'échauffement, de petites rotations, des mouvements peu amples durant 8 min. Les disques regorgent d'eau suite à la position horizontale maintenue durant le sommeil et l'eau rend le disque moins déformable, il devient plus fragile. La position érigée permet de faire sortir une partie du liquide et de rendre nos disques plus résistants à la compression. Ce mécanisme prend entre une à quatre heures selon l'âge et le poids de la personne (1, 2). Même si les données ont été obtenues sur des cadavres, elles restent intéressantes. Donc PAS DE FLEXION ET TORSION BRUTALE DE LA CV au réveil, mobilisez-la doucement et préparez votre dos.
Votre entraînement régulier sur cette partie du corps devrait permettre une adaptation des tissus conjonctifs et une consolidation permettant une meilleure protection.

Le gainage, une définition

D'un point de vue général, c'est la fonction qui décrit la capacité à maintenir une certaine "rigidité" articulaire tout en permettant un mouvement

sécurisé. ***Appliquée à la zone lombo-abdominale, cela devient la "capacité à contrôler la position et le mouvement du tronc par rapport au bassin pour permettre la production, le contrôle et le transfert optimaux de force et de mouvement des segments distaux dans les activités sportives" (23).***

Initialement, il faut comprendre l'origine de ce mot. "Gainage" vient du mot "gaine". Lorsque vous freinez sur un vélo, le câble en acier coulisse dans un tuyau en plastique, c'est la gaine du câble.
Les muscles qui entourent la CV et la maintiennent tel un corset (gaine) sont donc responsables du gainage du rachis.
Cependant, ce mot a été étendu aux autres articulations. Un renforcement du gainage sportif doit donc être général puisque nous ne sommes pas dans le cas de lombalgiques soucieux de leurs CV.

Nous ne devons pas nous limiter au renforcement lombo-abdominal ; il est nécessaire de l'étendre à ce qui se passe entre le tronc et les membres. La force passe par le bassin qui doit être maintenu par des adducteurs et abducteurs puissants. Une hanche forte permet une expression de la force améliorée.

*MUSCLES LOMBO-ABDOMINAUX	
MUSCLES LONGS (DYNAMIQUES)	**MUSCLES COURTS (STABILISATEURS)**
Grand droit de l'abdomen	**Multifide**
Oblique externe	**Psoas majeur**
Oblique interne (fibres antérieures)	**Transverse**
Iliocostal	**Oblique interne (fibres postérieures)**
	Diaphragme
	Iliocostal et longissimus (portion lombaire)
	Carré des lombes

Finalement le gainage, c'est le travail de force ? Oui, mais pas seulement. Ce travail est associé à la proprioception et l'équilibre, qui forment ce qu'on appellera ***"équilibrioception".*** Cf. chapitre 11 p. 508.
Le travail de gainage sur le terrain symbolise souvent les positions statiques. Sacrée erreur ! Nous considérons les mouvements en isométrie

comme les prémices du gainage, mais sûrement pas comme une finalité et encore moins un travail qui doit perdurer dans le temps.
L'aspect proprioceptif est limité voire parfois inexistant durant l'isométrie. Nous ne parlons pas de l'équilibre abordé dans un autre chapitre même si ces deux notions sont fortement interdépendantes.
Nous distinguons trois voire quatre types de gainages :

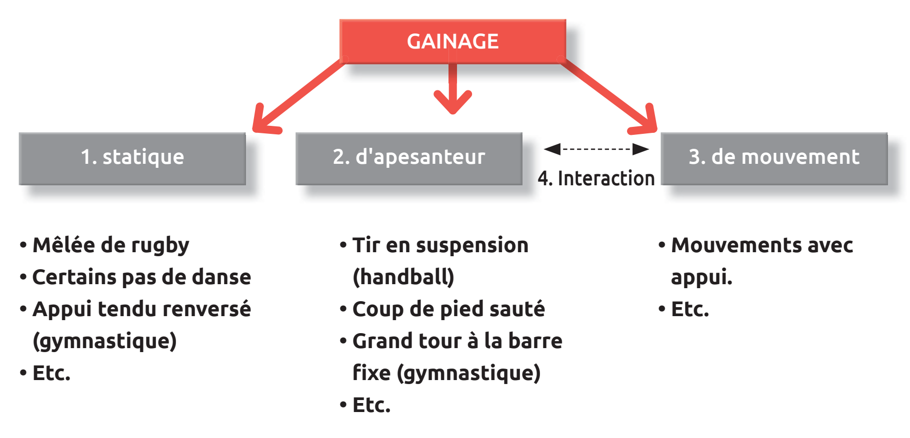


Figure 4 : Les différentes formes de gainage

Le ***gainage statique*** est rare. C'est une position d'attente en contrainte. Le porteur au cirque pourrait symboliser cette partie et pourtant il bouge sans cesse pour maintenir son équilibre. Une mêlée de rugby par moment l'est, mais il y a des forces en opposition et des déplacements, même de faible longueur. Il correspond au minimum d'activité. Donc difficile de trouver une situation correspondant exactement à cette forme de travail.

Le ***gainage d'apesanteur*** est une situation courante, un salto en gymnastique, un tir en suspension au handball, un virage en natation. Lors de ces situations, il faut être habitué à gérer cette position libérée de la gravité, sans appuis au sol, pourtant si confortables.

Le ***gainage de mouvement*** est le plus fréquent. Il va de la glissade en marchant au changement brutal de direction lors d'un match de football ou d'un sprint en ligne droite. L'épreuve du 100 m demande un bassin particulièrement stable, chaque appui créant des impacts entre 5 à 7 fois le poids de corps ; le bassin ne demande qu'à tourner en dedans et à s'affaisser.

Heureusement, les muscles fessiers s'occupent d'une bonne partie de la tâche. Le grand fessier évite l'endo-rotation, les petits et moyens évitent l'affaissement. Des spécialistes aiment dire "ce qui caractérise l'homme, c'est la fesse". La fesse[36] est un signe caractéristique des bipèdes, surtout de l'humain. Elle est proéminente car son rôle est important dans la statique. Lors des compétitions d'athlétisme, vous seriez surpris du nombre de deltoïdes fessiers hypertrophiés. Les quadrupèdes possèdent des muscles fessiers plus effacés. Pourquoi aimons-nous la position quadrupédique ? Un mystère de la nature...

L'interaction entre le gainage d'apesanteur et de mouvement est un peu ce que la course à pied est à la marche de compétition. La frontière est fragile entre l'un et l'autre puisque les deux peuvent coexister. Sprinter est un état de suspension bien qu'à l'œil, nous ayons une impression différente. Cette notion est importante pour la préparation spécifique.

Se méfier de la biomécanique simpliste qui propose des calculs de tension supportée par les vertèbres lombaires en flexion. Les chiffres peuvent paraître parfois alarmants au possible bien que nous soyons capables de beaucoup plus important encore. Des calculs classiques sur les muscles du cou (de 15 à 17 m de long) des diplodocus (en latin double poutre) arrivent à la conclusion qu'ils ne pouvaient pas lever leur tête. Il a fallu des études complexes pour commencer à comprendre leurs mouvements intégrant notamment les principes de tenségrité évoqués plus haut qui donnent une rigidité à la structure tridimensionnelle du cou sans forcément ajouter de la complexité au niveau physique.

Que dire de l'étude de Nachemson et coll. (6, 7) encore prise en référence alors que Wilke et son équipe ont publié (36-39) des données plus récentes avec des instruments plus précis ? (Figure 5).

Les recommandations amènent souvent à des propositions dépassées, vérifier l'information est une priorité.

36 / Du latin "fissa" : fente, fissure... rien à voir avec le mot arabe "fy sā ah", dans l'instant, sur l'heure

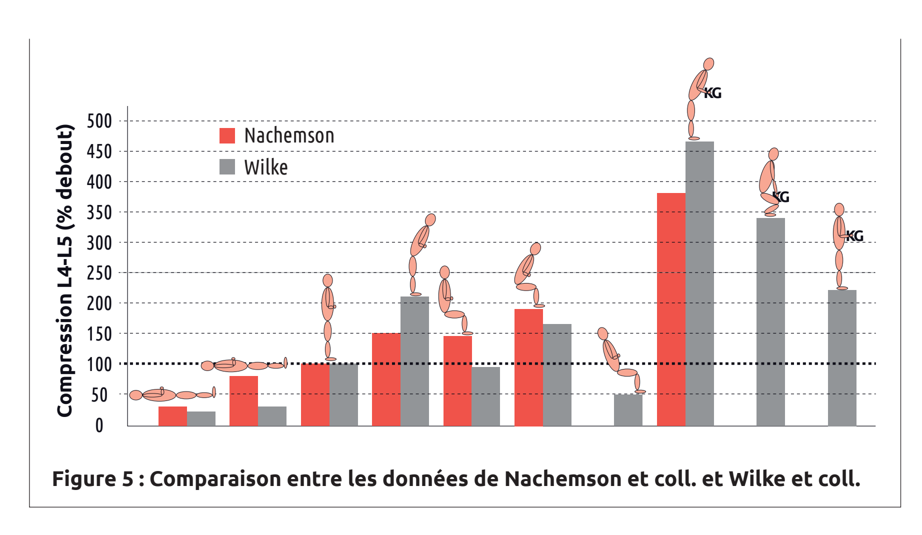
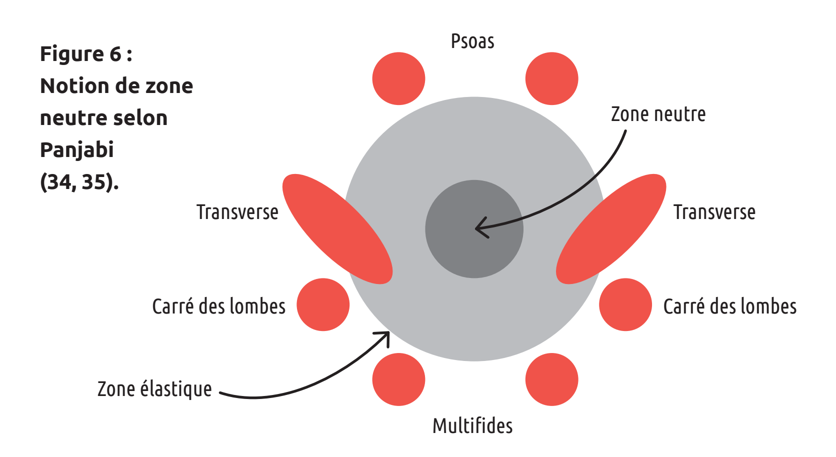


Figure 5 : Comparaison entre les données de Nachemson et coll. et Wilke et coll.

La figure 6 (34, 35) nous aide à comprendre les grandes lignes, le cœur du système, ce que les Anglo-saxons appellent "core", plus spécifiquement à la région lombo-pelvienne (8, 25, 27, 34, 35).

Figure 6 : Notion de zone neutre selon Panjabi (34, 35).



Si vous avez des problèmes de dos, que faire avant de reprendre ?
Comme expliqué lors de l'introduction, le mal de dos est la deuxième cause d'invalidité mais aussi la deuxième cause de consultation pour douleur (la première est le mal de tête).
Avant de se dire que faire, nous devons comprendre ce qu'il se passe.

La zone neutre est la zone de mobilité de la CV sans résistance contrairement à la zone élastique qui engendre une résistance passive au mouvement.

L'instabilité de la CV (et donc la probabilité de blessure) est due à l'augmentation de la zone neutre. Des muscles préparés (forts) limitent la zone neutre. Les deux muscles les plus concernés par cette action sont les multifides et le transverse. Le transverse pouvant faire défaut chez 15 % de la population, c'est l'oblique interne qui serait son remplaçant. Ce muscle en premier, quelle que soit la direction du mouvement. Il peut même s'activer de façon anticipée (autour de 50 ms) lorsqu'on sait à l'avance quelle orientation va prendre la force imposée comme lorsque nous faisons nous-même le mouvement. Les multifides s'activent un peu plus tard selon une direction préférentielle (14-17). L'anticipation est moins prononcée ou fait carrément défaut aux personnes sédentaires, non entraînées et/ou souffrant du dos ; ceci impose des contraintes supplémentaires dans cette région. Certains auteurs pensent même que les carrés des lombes (quadratus lumborum) sont aussi importants pour la stabilité par leur position privilégiée entre les lombaires et la partie supérieure de l'os coxal (10, 26). Les obliques internes étant synergistes du transverse, ces trois groupes musculaires (transverse, obliques, carrés) ont donc un rôle primordial dans cette stabilité (4).

Chez le lombalgique, il est constaté :

- Une faiblesse des érecteurs du rachis. Chiffre incroyable, 80% des lombalgies sont dues à une faiblesse musculaire (surtout les érecteurs).
- Il existe également un retard de contraction des stabilisateurs. Rappelons

que la co-contraction des muscles lombo-abdominaux est nécessaire à la stabilisation. Lever le bras demande en premier la contraction du tronc puis des muscles moteurs de l'épaule. Un retard de contraction du tronc peut entraîner une blessure selon le mouvement demandé.

Que faire ?

Il faut traiter l'ensemble des problèmes avec l'aide du médical et du paramédical, nous nous intéressons à la post-rééducation :

À traiter :
- douleur ;
- faiblesse musculaire ;
- déconditionnement à l'effort ;
- troubles de l'humeur ;
- problème professionnel lorsqu'il y a effort physique ➞ école du dos.

Sur le site de la HAS (Haute Autorité de la Santé), l'exercice physique supervisé est en première ligne dans la prise en charge du lombalgique. Cependant, il n'existe pas de recommandation type, mais s'il est conseillé la musculation et le stretching, il n'existe pas encore de consensus pour tester la stabilité centrale. Nous vous proposons néanmoins deux tests de terrain qui peuvent vous renseigner sur l'état de forme des muscles stabilisateurs, celui de Sorensen-Biering pour la chaîne postérieure et le Shirado pour la chaîne antérieure. Ils sont à faire avant toute prise en charge au gainage.

Test isométrique des extenseurs du rachis - Test de Sorensen-Biering :

Couché sur le ventre, un coussin sous les E.I.A.S (épines iliaques antéro-supérieures), mains sur la face externe des cuisses, le sujet est au garde à vous, il relève le buste, la tête restant dans le prolongement de la colonne vertébrale (effort isométrique). Chronométrer le temps effectué dans cette position. Un sujet "sain" tient deux minutes.

Si vous pouvez mettre la personne à plat ventre sur une table, c'est encore mieux (13). Elle positionne son pubis juste au bord de la table tout en étant allongée à plat ventre dessus. On applique une pression mains jointes sur le bas des lombaires à hauteur des épines iliaques postéro-supérieures et elle essaie de lever ses jambes à l'horizontale.

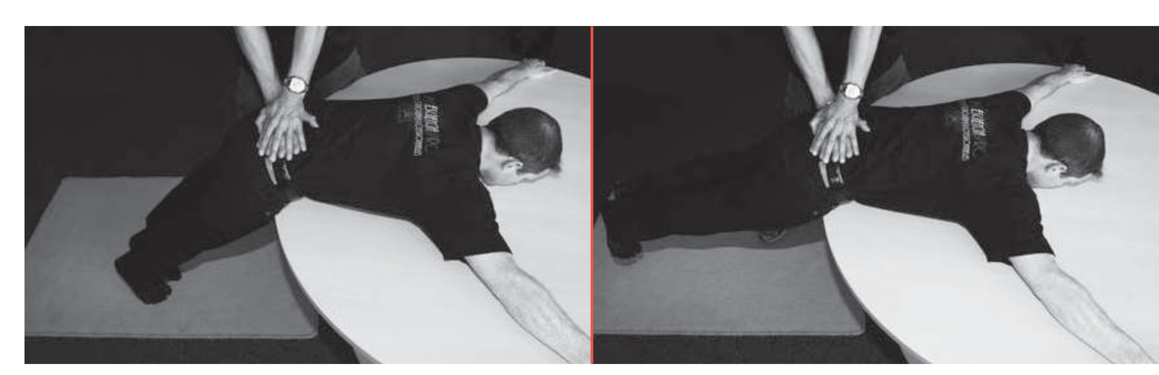


Figure 6 : Test d'instabilité segmentaire lombaire de Delitto (13).

Test isométrique des fléchisseurs du tronc – Test de Shirado

Allongé sur le dos, les segments cruraux verticaux, les segments jambiers horizontaux, les pieds à l'équerre, les bras croisés sur la poitrine, mains à la hauteur des épaules opposées, relever la tête et le buste du sol (effort isométrique).
Chronométrer le temps effectué dans cette position.
Si l'épreuve initiale dure moins de 20 secondes, le sujet est peu musclé. Les normes adultes sont de 90 à 190 secondes.
La valeur moyenne de maintien est de : 155 secondes ± 79.
Les lombalgiques tiennent en moyenne : 41 secondes ± 23.

L'entraînement musculaire dynamique s'accompagne d'un résultat positif à ces deux tests.
Pour étayer l'intérêt de l'exercice physique sur les douleurs chroniques, cette étude de Kell-Barden et coll. (ACSM 2009) teste le nombre de séances effectuées par semaine et sa relation avec l'efficacité ressentie.

Sur 240 participants, 4 groupes ont été créés :

- un groupe qui ne s'entraîne pas ;
- un groupe qui s'entraîne 2 fois par semaine à la réadaptation musculaire ;
- un groupe qui s'entraîne 3 fois par semaine à la réadaptation musculaire ;
- un groupe qui s'entraîne 4 fois par semaine à la réadaptation musculaire.

Au bout de treize semaines, c'est le quatrième groupe qui a connu le plus grand bénéfice avec 28 % de l'intensité de la douleur en moins et 36 % du degré de leur incapacité physique amélioré. Les autres groupes offrent des améliorations bien moindres.

Mieux, alors que le traitement chirurgical fait peur et n'est pas sans conséquence, cette étude de 2009 fait le bilan d'une quarantaine d'études. Dans la majorité des cas, l'exercice physique a été plus efficace que l'électrothérapie thermique intra-discale, l'injection épidurale, l'arthrodèse et l'arthroplastie discale. Conclusion confirmée la même année par une autre étude sur le renforcement musculaire général et les douleurs chroniques lombaires (22).

Les exercices à pratiquer doivent travailler de manière symétrique entre l'avant et l'arrière du tronc, ainsi que la souplesse. Cela peut contribuer à la régénération des disques car ils seront mieux irrigués.

Autre étude et non des moindres sur la manipulation de la CV par les chiropracteurs et ostéopathes dans le cas de douleurs chroniques. La conclusion, après avoir analysé 16 synthèses regroupant 239 études sur le sujet, est que vu les risques de la manipulation (effets mineurs jusqu'à de graves complications), il est préférable de chercher une méthode moins agressive.

2 • S'entraîner !

Mise en œuvre

Tous les protocoles conseillés demandent du renforcement lombo-abdominal, du stretching et même du cardio-training. Les bénéfices seront réels sur la douleur (sans que la science nous en dise les raisons), la capacité fonctionnelle et le délai du retour au travail.

ATTENTION ! Une personne ayant eu mal au dos a une appréhension lors de la reprise de l'activité physique ; une progression lente au début est nécessaire, les mouvements isométriques peuvent être préférés dans un premier temps. Une fois la peur surmontée, les résultats suivent rapidement.

Les améliorations sont nerveuses (recrutement d'unités motrices) et musculaires (hypertrophie, changement de typologie des fibres) comme dans tout entraînement.

Il faut bien comprendre que dans le cas d'un lombalgique ou d'une amélioration de la performance, les exercices intensifs sont à préférer aux exercices doux. En effet, perdre l'équilibre ou courir en virage sur un terrain de football demande un travail des fibres rapides. Les réflexes permettant de maintenir la posture d'équilibre sont violents, les entraînements basés sur l'endurance de ses muscles sont inadaptés.

Pour le lombalgique, il faudra suivre obligatoirement une progression lente mais il lui faudra des sollicitations importantes par la suite.

Les exercices et outils à disposition

Le proprio terrain, le Themix®, le Sombreri®, le Dynair®, le Bosu®, le Waff®, le Airex®, le Jungle Gym XT® et bien d'autres vous apporteront des situations de déséquilibre qui permettent un renforcement lombo-

abdominal efficace. L'idée est de bouger vos membres inférieurs ou supérieurs en obligeant le tronc à réadapter sa posture à chaque instant.

Trois exemples d'études pour appuyer nos dires

Marshall et Murphy (24) comparent la différence d'activité musculaire sur surface stable (banc) et instable (Swiss ball) grâce à l'électromyographie. 14 sujets volontaires ont participé à cette expérience : soit 9 hommes et 5 femmes. La résistance choisie pour l'expérience est de 60 % du 1 RM.
Les résultats démontrent que l'activité des muscles abdominaux augmente de façon considérable lorsque l'exercice est exécuté sur Swiss ball.

Il faut bien comprendre que les muscles moteurs comme les pectoraux ne sont pas davantage sollicités, ils sont à 60 % dans les deux cas, seuls les stabilisateurs augmentent en intensité.

Norwood et coll. (33) appuient avec cette étude qui démontre que les muscles stabilisateurs du tronc sont davantage sollicités lorsque le développé couché est effectué en instabilité.
10 hommes et 5 femmes confirmés dans l'entraînement fonctionnel (pas besoin d'apprentissage moteur). Six groupes musculaires, soit les grands dorsaux, les grands droits de l'abdomen, les obliques internes, les érecteurs du rachis, les soléaires et les biceps fémoraux, ont été observés. Leur recrutement a été étudié pendant le développé couché (charge de 9,1 kg) effectué en différents modes d'instabilité :

1 • sur un banc (surface stable) ;
2 • sur un Swiss ball (instabilité au niveau du haut du corps) ;
3 • sur un banc et un BOSU sous les pieds (instabilité du bas du corps) ;
4 • sur un Swiss ball et un BOSU sous les pieds (instabilité complexe pour le haut et le bas du corps).

Les relevés électromyographiques indiquent que le mode 4 était celui qui s'accompagnait de la plus grande sollicitation des groupes musculaires de

10 à près de 900 %... oui... vous lisez bien, jusqu'à 900% de plus que l'exercice en situation stable. Les érecteurs du rachis sont les plus sollicités ainsi que les biceps fémoraux. ATTENTION, même des sportifs supportent mal les exercices dans ces conditions, c'est pourquoi il faut arrêter immédiatement l'exercice si les plaintes sont importantes.
La conclusion rejoint d'autres études : les entraînements fonctionnels sont plus intéressants pour le gainage.

Anderson et Behm (5) démontrent que les squats sur surface instable offrent un stimulus d'entraînement des muscles du tronc, notamment la partie supérieure.
Sont observés les muscles soléaire, vaste externe, biceps fémoral, stabilisateurs de l'abdomen, érecteur du rachis lombaire supérieur et érecteur du rachis au cours de squats effectués dans des conditions variables de stabilité et de résistance.
14 hommes confirmés ont participé à l'étude. Bien que confirmés, deux semaines d'apprentissage sont effectuées afin d'améliorer l'expérimentation.

La stabilité a été modifiée lors des squats :
- condition très stable : squats sur un cadre guidé ;
- condition relativement stable : squats libres ;
- condition instable : squats avec disques d'instabilité sous les pieds.

Trois intensités ont été utilisées :
- aucune résistance externe (masse corporelle) ;
- 29,5 kg (poids de la barre du cadre guidé) ;
- 60 % de la masse corporelle.

10 répétitions à 90 degrés avec deux minutes de récupération entre les séries.
L'activité des muscles soléaire, stabilisateurs de l'abdomen, érecteur du rachis lombaire supérieur et érecteur du rachis lombo-sacré (mesurée à l'aide d'électrodes de surface) était significativement plus élevée lors de la

condition instable (disques d'instabilité) et plus faible lors de la condition stable (cadre guidé).
L'activité électromyographique était supérieure lors de la descente que lors de la montée !

NOUS CONSEILLONS de faire attention à la phase concentrique lors de l'exécution, la phase excentrique est très souvent plus sécuritaire.
NOUS CONSEILLONS de faire attention à la phase de transition lors de l'exécution.

Point clés

- Connaître parfaitement vos muscles et leurs fonctions avant toute chose.
- Connaître les synergies musculaires impliquées selon les formes de mouvement.
- Apprentissage moteur en priorité.
- Peu d'exercice et surtout de séries pour limiter les courbatures sur des muscles déjà atrophiés ou peu sollicités.
- Une progression lente ! ***Rappelez-vous que les structures engagées n'ont pas la même vitesse d'adaptation. Du plus rapide au plus lent : nerveuses, actives, passives.***
- Travailler les érecteurs et fléchisseurs du tronc ainsi que les stabilisateurs avant le travail de force.
- Ne pas oublier le stretching !
- Les mouvements avec faibles charges mais en situations de déséquilibre maîtrisé sont payeurs !
- Chez les personnes sédentaires ou ayant de fortes douleurs (3), commencer par les 3 mouvements importants ("BIG 3" de McGill (26)) : redressement du tronc, maintien latéral corps droit en appui sur le coude, position quadrupédique avec lever bras et jambe en opposition. Compléter par les exercices en position de pont (planche) ventral et dorsal.
- Inclure la respiration dans chaque exercice.
- De là construire une progression vers la position debout sans et avec charges additionnelles légères, sans ou avec élastiques, etc.

Point nouveau et surprenant sur les hernies discales

Approche descriptive : les dernières observations proposent une nouvelle description du disque intervertébral en le comparant à une articulation traditionnelle, capsule, ligament, cavité articulaire. Cette dernière subit donc les mêmes contraintes qu'une articulation. La croissance d'un disque durant de développement d'un fœtus se fait par adjonction de couches périphériques autour du ligament intervertébral, ce qui donne l'aspect en bulbe d'oignon. De ce fait la distinction entre le noyau et l'anneau n'est plus très judicieuse, la structure hétérogène est faite en deux parties avec des propriétés légèrement différentes. Aujourd'hui, il est préférable de parler de zone centrale ou périphérique. La zone centrale ayant le plus de contrainte mécanique, l'aspect bien régulier des fibres de collagène est "détruit", d'où la croyance d'une partie gélatineuse. Les IRM ne montrent pas de noyau mais un tissu plus hydraté et moins dense. Cette première partie nous démontre que la description anatomique encore enseignée est fausse et nous devrions prendre le disque comme une articulation capable de subir des agressions identiques. L'entorse discale devrait remplacer la hernie discale. Il n'y a pas de hernie (rien ne sort vraiment comme une partie d'un organe) mais un œdème ou une tuméfaction.

Traitement : certains grands spécialistes (professeur Chevrot) pensent qu'il ne faudrait pas opérer (lire son article "La hernie discale n'existe pas"). L'opération est un succès mais "nettoie" localement, d'où le phénomène inflammatoire stoppé, mais on observe 10 % d'échecs et 30 % de récidives. Il est possible d'avoir des entorses discales sans douleur et finalement le phénomène que l'on pensait physique semble inflammatoire, des injections locales semblent calmer la douleur. L'opération est discutable. La recherche de la douleur démontre bien souvent que celle-ci est très basse, plus souvent sur la région pelvienne (bassin), des douleurs pelviennes d'origine ligamentaire (pelvi-trochantériennes) ou musculotendineuses (moyens fessiers, ischio-jambiers). Cela démontre des erreurs du diagnostic initial. Idem pour la sciatique, une étude sérieuse démontre que des germes créent une inflammation. Une chute ou un traumatisme mineur peuvent finalement être à l'origine d'une brèche du disque et laisser grande ouverte la porte aux bactéries.

Méfiance et bien se renseigner auprès de son spécialiste de la santé avant de prendre une décision.

Bibliographie

• 1 • Adams MA, Dolan P, and Hutton WC. Diurnal variations in the stresses on the lumbar spine. Spine 12: 130-137, 1987.

• 2 • Adams MA, Dolan P, Hutton WC, and Porter RW. Diurnal changes in spinal mechanics and their clinical significance. J Bone Joint Surg Br 72: 266-270, 1990.

• 3 • Akuthota V, Ferreiro A, Moore T, and Fredericson M. Core stability exercise principles. Curr Sports Med Rep 7: 39-44, 2008.

• 4 • Akuthota V and Nadler SF. Core strengthening. Archives of physical medicine and rehabilitation 85: S86-92, 2004.

• 5 • Anderson K and Behm DG. Trunk muscle activity increases with unstable squat movements. Can J Appl Physiol 30: 33-45, 2005.

• 6 • Andersson BJ, Ortengren R, Nachemson A, and Elfstrom G. Lumbar disc pressure and myoelectric back muscle activity during sitting. I. Studies on an experimental chair. Scandinavian journal of rehabilitation medicine 6: 104-114, 1974.

• 7 • Andersson BJ, Ortengren R, Nachemson AL, Elfstrom G, and Broman H. The sitting posture: an electromyographic and discometric study. The Orthopedic clinics of North America 6: 105-120, 1975.

• 8 • Bergmark A. Stability of the lumbar spine. A study in mechanical engineering. Acta orthopaedica Scandinavica Supplementum 230: 1-54, 1989.

• 9 • Brandt T, Dieterich M, and Danek A. Vestibular cortex lesions affect the perception of verticality. AnnNeurol 35: 403-412, 1994.

• 10 • Grenier SG and McGill SM. Quantification of lumbar stability by using 2 different abdominal activation strategies. Archives of physical medicine and rehabilitation 88: 54-62, 2007.

• 11 • Hadders-Algra M, Brogren E, and Forssberg H. Ontogeny of postural adjustments during sitting in infancy: variation, selection and modulation. J Physiol 493 (Pt 1): 273-288, 1996.

• 12 • Hadders-Algra M, Brogren E, and Forssberg H. Training affects the development of postural adjustments in sitting infants. J Physiol 493 (Pt 1): 289-298, 1996.

• 13 • Hicks GE, Fritz JM, Delitto A, and Mishock J. Interrater reliability of clinical examination measures for identification of lumbar segmental instability. Archives of physical medicine and rehabilitation 84: 1858-1864, 2003.

• 14 • Hodges P, Kaigle Holm A, Holm S, Ekstrom L, Cresswell A, Hansson T, and Thorstensson A. Intervertebral stiffness of the spine is increased by evoked contraction of transversus abdominis and the diaphragm: in vivo porcine studies. Spine 28: 2594-2601, 2003.

• 15 • Hodges PW, Cresswell AG, Daggfeldt K, and Thorstensson A. Three dimensional preparatory trunk motion precedes asymmetrical upper limb movement. Gait & posture 11: 92-101, 2000.

• 16 • Hodges PW, Cresswell AG, and Thorstensson A. Perturbed upper limb movements cause short-latency postural responses in trunk muscles. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 138: 243-250, 2001.

• 17 • Hodges PW and Richardson CA. Feedforward contraction of transversus abdominis is not influenced by the direction of arm movement. Experimental brain research Experimentelle Hirnforschung Experimentation cerebrale 114: 362-370, 1997.

• 18 • Ingber DE. Cellular tensegrity: defining new rules of biological design that govern the cytoskeleton. Journal of cell science 104 (Pt 3): 613-627, 1993.

• 19 • Ingber DE. The architecture of life. Scientific American 278: 48-57, 1998.

• 20 • Ingber DE. Tensegrity and mechanotransduction. Journal of bodywork and movement therapies 12: 198-200, 2008.

• 21 • Karnath HO, Ferber S, and Dichgans J. The neural representation of postural control in humans. Proc Natl Acad Sci U S A 97: 13931-13936, 2000.

• 22 • Kell RT and Asmundson GJG. A Comparison of Two Forms of Periodized Exercise Rehabilitation Programs in the Management of Chronic Nonspecific Low-Back Pain. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 513-523, 2009.

• 23 • Kibler WB, Press J, and Sciascia A. The Role of Core Stability in Athletic Function. Sports Medicine 36: 189-198, 2006.

• 24 • Marshall P and Murphy B. Changes in muscle activity and perceived exertion during exercises performed on a swiss ball. Appl Physiol Nutr Metab 31: 376-383, 2006.

• 25 • McGill SM. Low Back Stability: From Formal Description to Issues for Performance and Rehabilitation. Exercise and sport sciences reviews 29: 26-31, 2001.

• 26 • McGill SM. Low Back Disorders: Evidence-Based Prevention and Rehabilitation. Champaign, IL: Human Kinetics, 2002.

• 27 • McGill SM, Grenier S, Kavcic N, and Cholewicki J. Coordination of muscle activity to assure stability of the lumbar spine. J Electromyogr Kinesiol 13: 353-359, 2003.

• 28 • Mittelstaedt H. Somatic versus vestibular gravity reception in man. AnnNYAcad Sci 656: 124-139, 1992.

• 29 • Mittelstaedt H. Evidence of somatic graviception from new and classical investigations. Acta oto-laryngologica Supplementum 520 Pt 1: 186-187, 1995.

• 30 • Mittelstaedt H. Origin and processing of postural information. NeurosciBiobehavRev 22: 473-478, 1998.

• 31 • Mittelstaedt H and Glasauer S. Crucial effects of weightlessness on human orientation. J VestibRes 3: 307-314, 1993.

• 32 • Mittelstaedt H and Glasauer S. Illusions of verticality in weightlessness. Clin Investig 71: 732-739, 1993.

• 33 • Norwood JT, Anderson GS, Gaetz MB, and Twist PW. Electromyographic activity of the trunk stabilizers during stable and unstable bench press. J Strength Cond Res 21: 343-347, 2007.

• 34 • Panjabi MM. The stabilizing system of the spine. Part I. Function, dysfunction, adaptation, and enhancement. Journal of spinal disorders 5: 383-389; discussion 397, 1992.

• 35 • Panjabi MM. The stabilizing system of the spine. Part II. Neutral zone and instability hypothesis. Journal of spinal disorders 5: 390-396; discussion 397, 1992.

• 36 • Rohlmannt A, Claes LE, Bergmannt G, Graichen F, Neef P, and Wilke HJ. Comparison of intradiscal pressures and spinal fixator loads for different body positions and exercises. Ergonomics 44: 781-794, 2001.

• 37 • Schmoelz W, Huber JF, Nydegger T, Claes L, and Wilke HJ. Influence of a dynamic stabilisation system on load bearing of a bridged disc: an in vitro study of intradiscal pressure. European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 15: 1276-1285, 2006.

• 38 • Wilke HJ, Neef P, Caimi M, Hoogland T, and Claes LE. New in vivo measurements of pressures in the intervertebral disc in daily life. Spine 24: 755-762, 1999.

• 39 • Wilke HJ, Wolf S, Claes LE, Arand M, and Wiesend A. Influence of varying muscle forces on lumbar intradiscal pressure: an in vitro study. J Biomech 29: 549-555, 1996.



13

Comment utiliser l'électrostimulation pour les différentes qualités physiques ?

Sommaire

Introduction 555

L'électro-neuro-myo-stimulation ; étymologie "populaire" 555
Historique 555
Principes techniques de l'ES 556
Conseils rapides 563
Fréquence d'utilisation 566

Bibliographie 566

Introduction

L'électro-neuro-myo-stimulation ; étymologie "populaire"

Le terme fait sourire parfois, selon le domaine professionnel. Par arrogance ou par excès de zèle, le terme se voit ajouter des syllabes qualificatives. Les revues de médecine vont la nommer électroneuromyostimulation, les revues de kinésithérapie vont employer le terme d'électromyostimulation, le commun des mortels dont les sportifs font partie nommera électrostimulation l'appareil du commerce ayant pour fonction de faire bouger leurs muscles.

La définition offerte par les organismes de vente est : *appareil électrique stimulant la partie terminale des nerfs moteurs en envoyant une impulsion électrique appliquée au niveau cutané.*

Historique

Initialement, quelques expériences de biologie sur muscle isolé ou dénervé ont permis de comprendre que les courants électriques dictaient la commande motrice. La notion d'influx nerveux nous vient de l'un des pères de la médecine et de la pharmacie, Galien (médecin grec né en 129). Bien des expériences ont été faites depuis son époque, mais c'est Luigi Galvani qui a popularisé l'électrophysiologie (qui en a même la paternité). Son expérience sur la grenouille fut si brillante que le public de l'époque fut enthousiasmé au point que l'expression suivante "être galvanisé" naquit (provoquer l'enthousiasme de quelqu'un). Après recherche et apprentissage des bons courants, il a été démontré la possibilité de muscler du tissu musculaire dénervé afin d'éviter l'atrophie. C'est en réhabilitation qu'on utilisera pour la première fois cet outil pour des suites opératoires ou des traumatismes musculaires (élongations, déchirures). Puisque l'action volontaire est limitée ou difficile, autant faire gagner du temps aux tissus ; lorsque la commande est rétablie, la rééducation est d'autant plus rapide.

C'est dans les années 70 que des Russes, Krcka et Zrubak, ainsi que Kots et Chwilon, ont pensé à l'utiliser pour les personnes saines (36 sujets, muscles biceps et triceps sural) et pour la performance (lutteurs sur les mêmes muscles).

Depuis, l'ES a fait ses preuves et, en 2013, les études en démontrant l'intérêt validé sont très nombreuses, tous les aspects sont exploités : les coronariens avec ou sans insuffisance cardiaque, les paraplégiques, les insuffisants respiratoires, les seniors en orthopédie pré et post-opératoire, les sportifs comme le disaient nos anciens étudiants, cela fonctionne chez tous le monde (Porrini and Coll, 2012). La critique de certaines études réside dans la comparaison de l'ES avec l'entraînement dit classique, sans compter les études s'intéressant à des muscles discutables (fléchisseur d'orteils, muscles de la main).

L'électrostimulation est-elle plus efficace que l'entraînement ? Non, l'ES a des gains dans tous les domaines, mais pas au-dessus de l'entraînement classique. Mais nous ne demandons pas à une technique d'entraînement d'être meilleure, nous lui demandons d'être efficace et différente. Nous attendons tout de même de nouvelles publications, car l'ES a souvent été mal utilisée, les sportifs ayant tendance à la pratiquer de manière isométrique (statique). Avec la nouvelle génération d'appareils sans fil que nous utilisons depuis le début (l'ES se fait durant le mouvement "traditionnel"), des résultats différents pourraient être publiés. De là à obtenir une efficacité supérieure, nous émettons quelques réserves, surtout sur le public sportif.

Principes techniques de l'ES

La cellule nerveuse possède un potentiel de repos de – 70 millivolts, la face interne est négative. Abaisser la tension à – 50 mV suffit à déclencher un potentiel nerveux (information). En plaçant les électrodes à la surface du muscle, il est possible de stimuler le nerf moteur. Pour vous aider, les manuels déterminent l'emplacement standard exact. Nous sommes tous différents, il est possible de devoir affiner la recherche du nerf moteur à

l'aide d'un stylet fourni avec les appareils. Avec ce mode de fonctionnement, il a toujours été dit que l'ES était une stimulation périphérique et non centrale, c'est-à-dire que le cerveau et la moelle épinière n'étaient pas sensibilisés durant le travail musculaire. Le corps est suffisamment bien conçu par Mère Nature, lorsqu'une terminaison nerveuse est stimulée, elle obéit directement mais informe les centres supérieurs (par les voies sensitives) et ceux-ci viennent additionner de l'aide. Une étude a observé par résonance magnétique les zones du cerveau en action durant l'ES concernant la stimulation du quadriceps. Cela se nomme une réponse hémodynamique, lorsque le mouvement se crée, des zones du cerveau sont activées. Normalement, la théorie aurait voulu qu'aucune zone du cerveau ne s'allume, or, cinq zones ont démontré de l'intérêt : l'aire primaire sensorielle, l'aire primaire motrice, le gyrus cingulaire et le thalamus.

Électrostimulation, une commande périphérique ou centrale ?

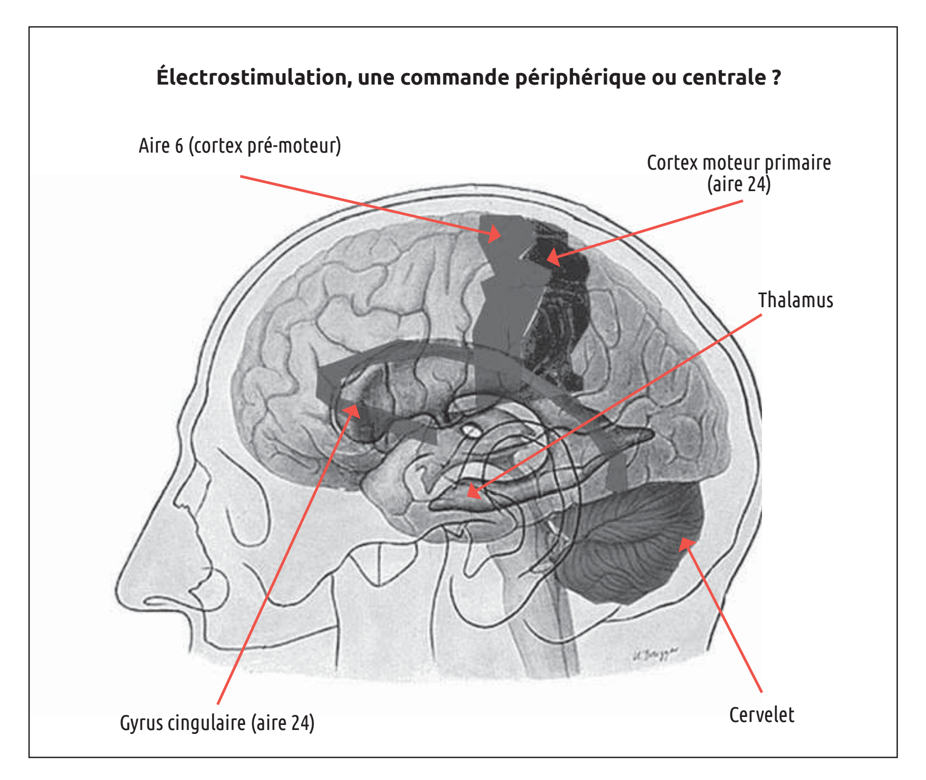


Figure 1 : Zones du cerveau activées lors de l'électrostimulation (d'après Brigger).

Finalement, pour les utilisateurs de l'ES, cette étude valide ce que le terrain et d'autres expérimentations avaient déjà observé.

En effet, l'entraînement de la cuisse droite améliore également la cuisse gauche (effet controlatéral de la force comme en musculation), gain de force sans hypertrophie (adaptations nerveuses comme en musculation). L'ES a des adaptations assez proches de l'entraînement volontaire. Les effets centraux de l'ES sont donc démontrés.

Physiologiquement, il reste des différences ; l'influx nerveux a été longtemps observé et quelques règles semblent universelles comme :

- l'influx nerveux est asynchrone ;
- les petites unités motrices sont stimulées avant les grandes, les lentes avant les rapides ;
- turn-over des fibres utilisées, principe d'économie énergétique des fibres.

En ES :

- l'influx nerveux est synchrone ;
- les fibres rapides peuvent être directement stimulées ;
- pas de turn-over des fibres, ce qui entraine une grande fatigue de celles-ci et de lourds dommages musculaires proches des électrodes.

Les machines possèdent les bons réglages, certaines peuvent tout de même être "manipulées" afin de personnaliser les programmes. Les propriétés physiologiques des courants sont connues : certains courants rectangulaires, exponentiels, hémisphériques, faradiques, carrés sont connus pour des propriétés comme l'excito-motricité, des propriétés vasculaires et antalgiques. La lontophorèse (faire passer des substances médicamenteuses par le courant galvanique ou constant) est une application possible de l'ES mais ne concerne pas le sportif. Sans maîtrise de l'outil, nous déconseillons l'achat de ces machines. Les hauts de gamme non médicaux sont déjà performants, il est présomptueux de penser obtenir mieux.

Aujourd'hui, deux grandes utilisations sont effectives, ce qui donne deux grandes familles de programmes :

- le NMES (electrostimulation neuromusculaire) : les qualités de force, hypertrophie, explosivité, endurance ;
- le TENS (neurostimulation électrique transcutanée) : le principe est de limiter les informations douloureuses en stimulant les fibres sensorielles. Programme très utile dans le domaine sportif.

ÉLECTROSTIMULATION, LES GRANDES LIGNES	
Traitement des pathologies	Utilisation sur personne saine ou sportive
Atténuer la douleur	Lipolyse
Atténuer les œdèmes	Force
Traiter l'incontinence	Endurance
Rééducation	Récupération
Réduire l'atrophie, faire de l'hypertrophie	Explosivité

Tableau 1 : Objectif de l'électrostimulation sur public pathologique et sain.

Un peu plus de technique

- Forme de l'onde (rectangulaire, biphasique, symétrique).
- Largeur d'impulsion (correspond à la chronaxie des axones stimulés) (>200 et <400 µs).
- Fréquence >50 et <150 Hz (pour optimiser le tétanos parfait musculaire). Mais il peut descendre en-dessous de 5 Hz, p. ex., pour l'endorphinique.
- Amplitude du courant en mA (maximise la tension musculaire) (0 – 120 mA).
- Cycle de travail 5-6 s de contraction suivie de 20-30 s de récupération.
- Durée du traitement (15-20 minutes = 20-30 contractions).

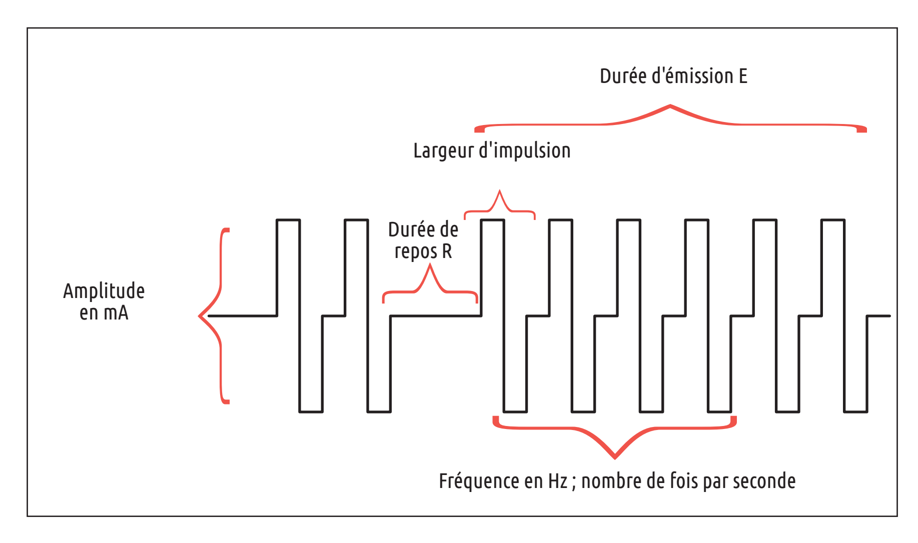


Figure 2 : Description d'une onde d'électrostimulation.

Les appareils actuels optimisent la recherche de courant adapté au muscle et à l'individu en effectuant un "scan". La chronaxie et la rhéobase sont ainsi trouvées et vous pouvez bénéficier des bienfaits de l'appareil. La rhéobase est définie comme étant la plus petite intensité d'une impulsion nécessaire à produire une contraction musculaire (souvent double de la chronaxie), la chronaxie est la plus petite durée d'une impulsion électrique nécessaire pour produire une réponse.

Dernier point, non des moindres, déjà légèrement évoqué plus haut mais sur lequel nous insistons : l'ES stimule les mêmes fibres motrices durant la séance. Cela entraîne une hyperstimulation de certaines fibres, ainsi la demande métabolite est plus importante qu'un travail volontaire.

La consommation d'oxygène, la production de lactate et la consommation de phosphorylcréatine sont multipliées entre deux et cinq fois. Aucun travail en endurance n'obtient cette fatigue, l'exploitation du muscle est maximale. La conséquence est évidente, une grosse fatigue derrière ce type de séance, des courbatures importantes (et surprenantes) de plusieurs jours.

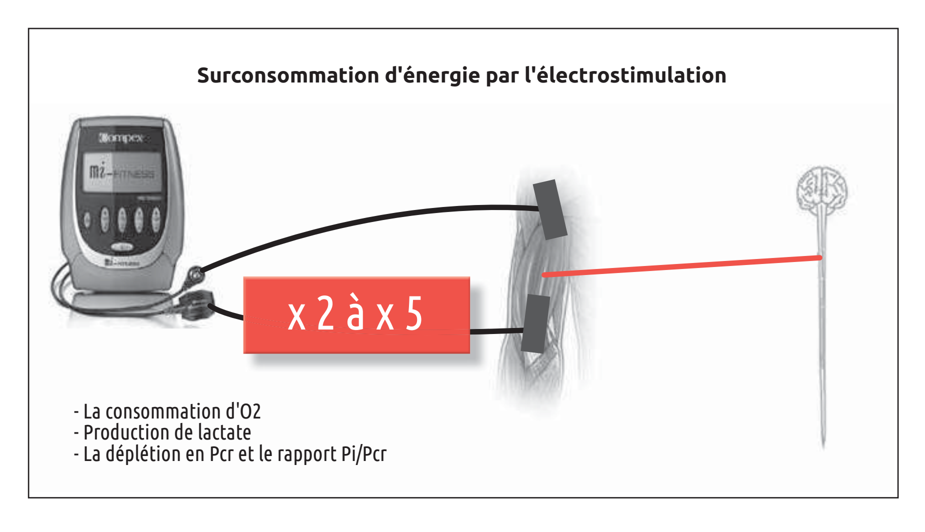


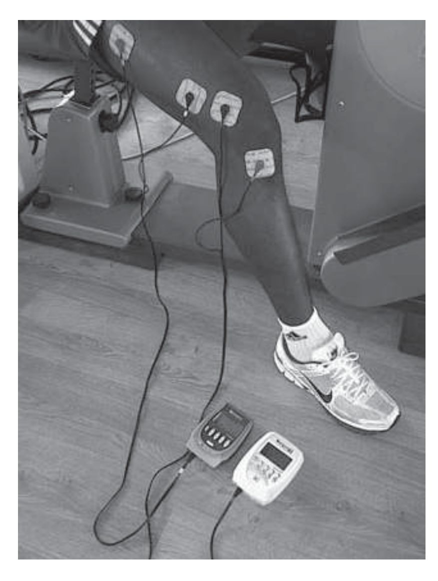
Figure 3 : L'électrostimulation "shunte" la commande nerveuse centrale et exagère la demande métabolique.

Nous voyons dans l'utilisation de l'ES certains aspects comme :

- l'apport d'un travail alors que la motivation du sportif n'est pas au plus haut ;
- une utilisation importante des fibres musculaires, dépassant l'entraînement habituel ;
- une utilisation pour la récupération avec des fonctions massages. Même si les publications ne sont pas unanimes, certaines vont dans le sens positif et surtout, aucune ne démontre d'aspect négatif. Sachant que nos sportifs apprécient, nous insistons sur son utilisation dans le cadre de la préparation physique pour sportifs de tous niveaux.



Paul Pogba (équipe de France), Brice Samba (OM) et Mathias Pogba (équipe de Guinée).



Programme antidouleur et décontracturant avec deux appareils + un travail aérobie sur vélo à bras.

Conseils rapides

Nous n'utilisons que les appareils de la marque Compex, nous ne connaissons pas les autres et le sérieux de cette entreprise nous inspire confiance depuis le début. Il est tout de même possible d'aller sur des sites concurrents et d'avoir pour images véhiculées que l'ES muscle sans effort, de voir des acteurs passer la tondeuse et dire qu'ils se musclent. Très bonne initiative, nous ne cautionnions pas ce genre de matériel.

Les appareils possèdent en général des patchs d'électrodes personnels. À titre d'information, cela s'offre à des clients si vous êtes professionnel, pour des raisons d'hygiène évidentes.

Petite astuce : pour vos électrodes personnelles, le lavage rapide à l'eau froide savonneuse et en les séchant juste après améliore leur durée de vie (un peu à l'image des mains collantes que nous avions étant jeune). Nous nous doutons bien que cette information ne doit pas plaire aux organismes de vente, mais chez vous, le soir, les magasins étant fermés, il est utile de pouvoir réutiliser ses patchs. Nous dénonçons la pratique sur client, nous n'osons imaginer que les kinésithérapeutes le fassent bien entendu.

Le gel fourni a une utilité bien sous-estimée, il permet d'améliorer la conductivité du courant, limite la nociception (douleur) et donc améliore l'efficacité de la séance ; l'intensité est augmentée. De plus, l'utilisation temporelle des patchs est augmentée également.

Le placement des électrodes est très simple, les manuels fournis vous indiquent comment faire. Une maîtrise de l'anatomie vous permet de vous passer du manuel.

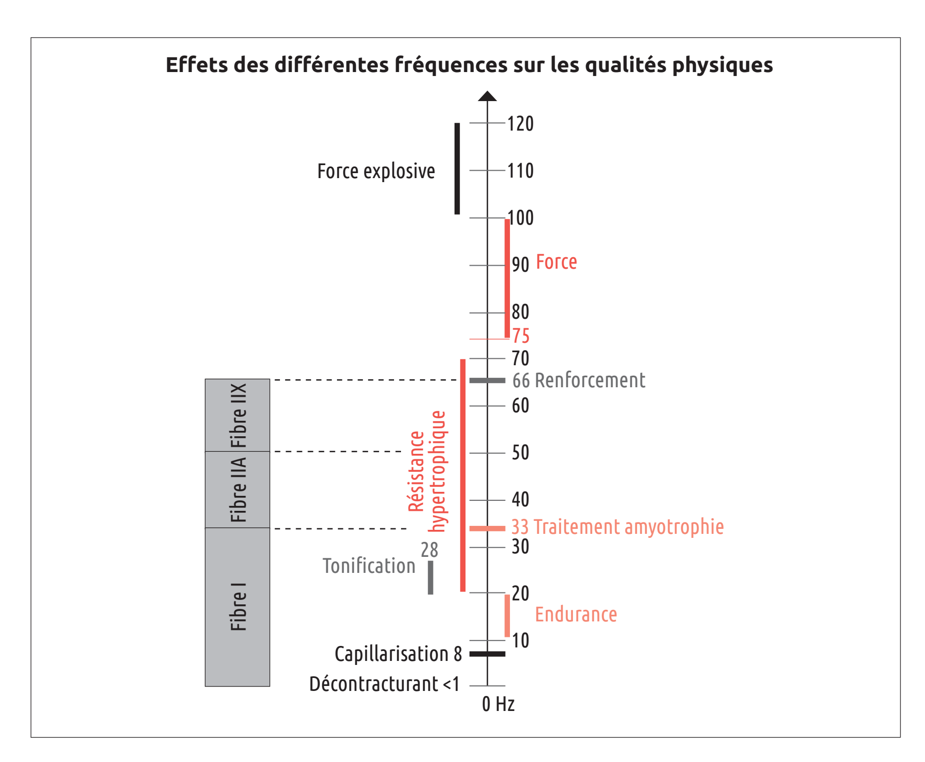


Figure 4 : Programmes et hertz associés.

Tableau 2 : Quelques programmes et caractéristiques

Amyotrophie	Premier stade de traitement d'un muscle atrophié (= qui a perdu du volume).
Anaérobie	Pour tous les mordus des efforts intenses et soutenus, ce programme améliore la capacité des muscles à résister à l'effort.
Capillarisation	Ce programme, qui multiplie par cinq le débit sanguin, favorise le développement des capillaires sanguins, essentiellement autour des fibres rapides. Les muscles gagnent en résistance, et leur récupération après l'effort est plus rapide. À consommer quelques jours avant votre épreuve. De par son action, la capillarisation facilite également le retour veineux et soulage les jambes lourdes.
Décontracturant	Ce programme offre un excellent moyen pour réduire vos tensions musculaires aiguës et localisées (ex. : lumbago ou torticolis) et obtenir un effet relaxant et décontracturant particulièrement agréable.

Endurance	Tout est dit dans son nom ! Ce programme long (55') et d'intensité moyenne accroît la capacité des muscles à consommer de l'oxygène, en augmentant leur vascularisation tout en faisant travailler les fibres musculaires lentes. Un vrai travail de fond pour tous les sports d'endurance : marathon, triathlon, ski de fond.
Force	Idéal pour tous les sports dans lesquels un gain de force améliore la performance : le cyclisme, le football, le ski alpin, le judo, la musculation… Ce programme permet d'améliorer la force maximale des muscles stimulés, sans contraintes articulaires brutales et sans risque de blessure. Il peut même remplacer la musculation traditionnelle avec charges lourdes.
Force explosive	Destiné aux sports associant très grande vitesse et efforts courts, comme le volley-ball, le basket-ball, le sprint, les sauts ou les lancers, ce programme permet d'améliorer la vitesse de contraction musculaire sans le moindre risque de blessure, contrairement aux entraînements volontaires spécifiques qui doivent toujours être très intensifs et qui sont souvent très traumatisants pour les tendons et les articulations.
Hypertrophie	Ce programme impose au muscle une quantité de travail considérable. Il est destiné aux body-builders ou à toute personne qui souhaite augmenter sa masse musculaire et obtenir une meilleure résistance du muscle à la fatigue.
Musculation	Inscrit dans une logique de prise de masse musculaire, il complète et prolonge harmonieusement un cycle d'initiation musculaire.
Renforcement	Il a pour but de développer la force du muscle revenu à son volume initial. Si le muscle traité n'est pas atrophié, ce programme peut intervenir dès le début de la réhabilitation.
Résistance	Ce programme est particulièrement adapté aux sportifs produisant un effort très intense de plus de 10 secondes : le VTT ou le 400 mètres par exemple. Il pousse les muscles au maximum de leur capacité lactique dans le but d'augmenter la sollicitation et de réduire le nombre de séances d'entraînement volontaire. Idéal aussi pour renforcer sa ceinture abdominale et les muscles lombaires.
TENS	Le TENS est un programme antidouleur très utilisé par les kinésithérapeutes afin d'atténuer, voire faire disparaître une douleur locale. L'effet antalgique apparaît progressivement en cours d'application, pour culminer après 20 minutes. Selon les cas, l'effet persiste plus ou moins longtemps après l'arrêt du programme. Attention : ce programme ne doit pas être utilisé de façon prolongée sans l'avis d'un médecin.
Tonification	Une action de fond sur les muscles. Il les remet au travail et les prépare à une phase plus intense de raffermissement.

Fréquence d'utilisation

Pour obtenir des gains réels, la revue de littérature de Filipovic 2012 indique que quatre à six semaines d'affilée semblent idéales pour obtenir tous les bénéfices.

S'acclimater à l'ES demande un peu de temps comme l'entraînement en musculation : une fois par semaine durant trois semaines chez le non sportif avant de passer à deux séances par semaine. Le sportif peut commencer avec deux séances par semaine en sous maximal mais sans descendre en dessous de 50 % de sa force maximale. Plus de trois séances par semaine n'est pas conseillé ; si le choix est porté sur trois séances, deux séances "dures" et une "légère" sont à conseiller. En plus des trois séances par semaine, faire au moins un entraînement traditionnel.

Bibliographie

1 • Gerald V. Smith , Gad Alon , Steven R. Roys , Rao P. Gullapalli Détermination IRM fonctionnelle d'une relation dose-réponse au membre inférieur stimulation électrique neuromusculaire chez les sujets sains Mai 2003 , Volume 150 , Issue 1 , pp 33-39 Experimental Brain Research.

2 • Kibi_sa, R, Gr_unovas, A, Poderys, J, and Gr_unovien _ e, D. Restoration of the work capacity of the skeletal muscle with electrical myostimulation. J Strength Cond Res 27(2): 449–457, 2013.

14

Comment établir une planification ?

Sommaire

1 • Introduction 569

Comprendre la planification par son histoire 569
Terminologie usuelle et sûrement inefficace dans la construction 570
Se construire une logique d'entraînement 572
Peut-on développer toutes les qualités physiques en même temps ? 574
Synthèse des qualités physiques exprimées dans l'ouvrage 576

2 • Exemples de progression sur les différentes qualités physiques 582

Endurance 582
Perte de poids 585
Force 587
Explosivité 588
Vitesse 589
Masse musculaire 590
Souplesse 592
Équilibre 595
Gainage 598
Des séances mixtes (FORCE – EXPLOSIVITÉ – ENDURANCE…) 601
Conclusion 602

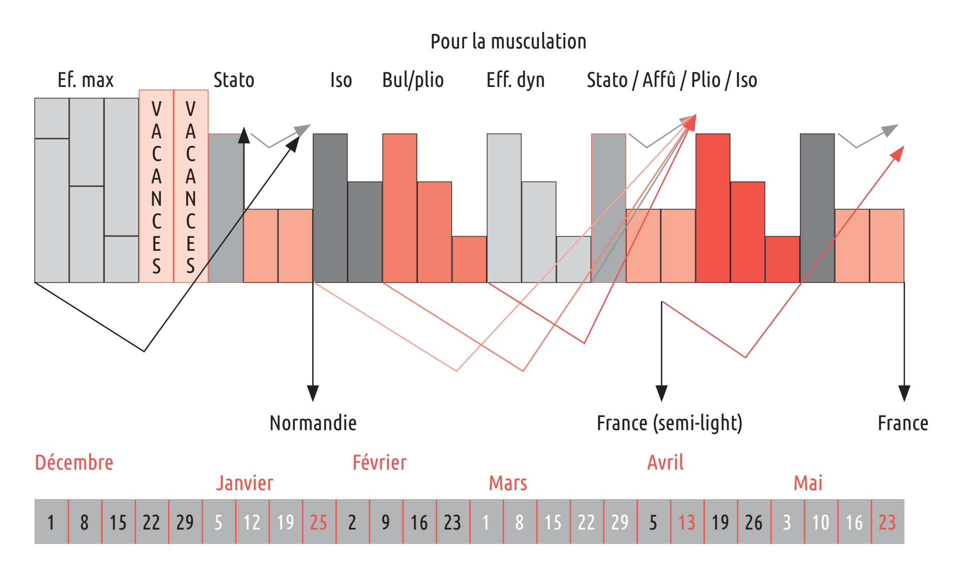
Bibliographie 603

1 • Introduction

Comprendre la planification par son histoire

Dans le domaine de la préparation physique, les pays de l'Est ont été très productifs, ils nous ont légué toutes les bases actuelles. Nous ne ferons pas un historique détaillé, d'autres ouvrages le font. La logique à retenir est surtout la suivante : la politique des années 50 a été dictée par des quinquennats économiques, le sport suit cette logique avec des modèles de planification. Les Russes n'ont pas inventé la planification de l'entraînement, c'est l'aboutissement du travail de nombreux pays et nations, mais ils ont intellectualisé une méthodologie et une terminologie qui influencent encore les sportifs. La périodisation est donc un jeu de Légo, les petits s'emboîtent pour construire un édifice plus solide. Mais il est possible de changer le projet durant son exécution, de modifier la forme, la couleur…

Au final, cela peut ressembler à :



Ici sont représentés des cycles d'entraînement de une à trois semaines (colonnes de la même couleur) qui correspondent à des méthodes différentes. Toutes ces méthodes doivent avoir des effets cumulatifs qui permettent d'être au plus haut point de la performance à un moment précis.

Aussi joli et professionnel que cela puisse paraître, c'est de la poudre aux yeux. Il suffit de réaliser que l'entraînement à un certain niveau ne tient pas toujours ses promesses. Bolt bat-il systématiquement son record à chaque compétition ? Les joueurs de tennis servent-ils toujours de plus en plus fort lors des tournois ? Le champion d'haltérophilie bat-il son propre record à chaque entraînement ?

L'entraînement est multifactoriel, se maintenir est parfois une grande performance.

À niveau sportif plus "faible", rassurons-nous, la possibilité de progresser est tellement présente que les résultats sont présents, il faut "simplement" éviter de se blesser et varier les méthodes.

Terminologie usuelle et sûrement inefficace dans la construction

Si vous entendez les mots, macrocycle, mésocycle, cycle, microcycle, sachez que vous êtes en train de lire une périodisation de l'entraînement. Les termes PPG, PPO, PPA (3 types) et PPS sont également une terminologie à la "mode".

Bien que sûrement utiles à de nombreux collègues, nous ne nous servons pas de ces termes et arrivons très bien à construire nos logiques d'entraînement sans eux. Hormis pour remplir les cours de STAPS et intellectualiser une pratique, cette utilité est discutable.

Terme	Terme complet	Définition
Cycle annuel	Cycle annuel	Programmation sur l'année
Macrocycle	Macrocycle	Période de 3 à 6 mois
Mésocycle ou Cycle	Mésocycle ou cycle	4 à 6 semaines
Microcycle	Microcycle	Semaine
PPG	Préparation physique généralisée	Terme qui explique que le début d'un entraînement est une remise en forme générale, tous les muscles seront "réveillés" par une remise en tension.
PPO	Préparation physique orientée	Les exercices sont assez proches de la discipline, mais les charges peuvent être bien plus lourdes ou les durées exagérées. L'entraînement tente d'être spécifique mais la priorité reste le développement des qualités physiques.
PPA	Préparation physique auxiliaire	Autre terme pour PPO. Le sport se plaît à trouver de nombreux termes pour décrire un même évènement.
PPA	Préparation physique athlétique	Terme qui revient à parler de PPG.
PPA	Préparation physique associée	L'entraînement du physique est contenu dans la séance de la discipline pratiquée, mais la cassure est nette entre le sport lui-même et la préparation physique. Échauffement puis entraînement de la vitesse (10 minutes), entraînement "normal" puis arrêt pour faire 5 minutes d'équilibres, reprise...
PPS	Préparation physique spécifique	L'entraînement physique est au plus proche de l'activité principale par le choix des exercices, leur durée…
PPI	Préparation physique intégrée	Terme "réinventé" qui finalement revient à expliquer que l'entraînement physique est le thème travaillé par la discipline dominante. Si vous êtes un boxeur, votre séance d'aujourd'hui au sac de frappe va être plus longue, vous travaillerez l'endurance sans en être "conscient".
PPD	Préparation physique dissociée	Vocabulaire expliquant que l'entraînement physique se fait en dehors de la séance d'entraînement spécifique à l'activité. Il faudra travailler l'endurance ou la musculation à un autre moment de la journée.

**Tableau 1 : Nommer l'inutile ou la "bouillabaisse"* terminologique
(* Hommage à F. Aubert pour ce terme).**

Nous voilà bien avancés… Au moins, lorsque vous les lirez, vous comprendrez leurs sens. Nous utilisons encore le terme de cycle et de PPG, le reste n'est que de la terminologie…

Se construire une logique d'entraînement

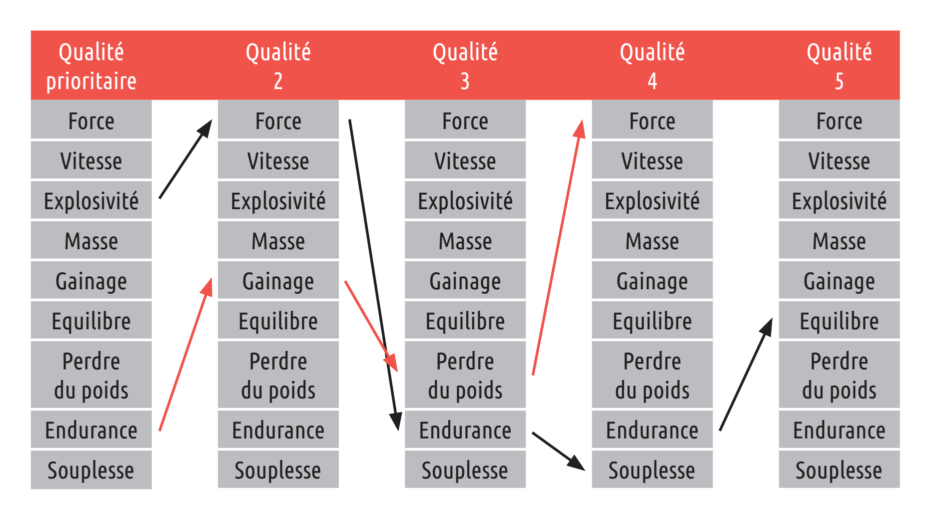
Il ne faut pas aller trop loin dans une planification, c'est une perte de temps incroyable qui rassure peut-être certains esprits, mais qui va assurément vous voler des heures.

Il est commun dans le domaine de la préparation physique de mentionner que le meilleur outil pour construire une planification sur papier, c'est la gomme. Tellement connu mais tellement vrai.

- Comment prévoir l'évolution des performances ?
- Comment prévoir un changement d'emploi du temps ?
- Comment prévoir une blessure ?
- Comment prévoir une déprime passagère ?
- Comment prévoir le temps qu'il fera pour les séances outdoor ?
- Comment prévoir l'imprévisible ?

Ne perdez pas votre temps, faites-nous confiance, le plus important, c'est d'identifier les besoins. Un arbre décisionnel aide dans l'essentiel des qualités à travailler. Nous vous proposons l'exemple ci-après, mais d'autres formes sont possibles.

Fixer ses objectifs, c'est imaginer son chemin.



Qualité prioritaire	Qualité 2	Qualité 3	Qualité 4	Qualité 5
Force	Force	Force	Force	Force
Vitesse	Vitesse	Vitesse	Vitesse	Vitesse
Explosivité	Explosivité	Explosivité	Explosivité	Explosivité
Masse	Masse	Masse	Masse	Masse
Gainage	Gainage	Gainage	Gainage	Gainage
Equilibre	Equilibre	Equilibre	Equilibre	Equilibre
Perdre du poids	Perdre du poids	Perdre du poids	Perdre du poids	Perdre du poids
Endurance	Endurance	Endurance	Endurance	Endurance
Souplesse	Souplesse	Souplesse	Souplesse	Souplesse

Exemple 1 en noir : un sportif ayant besoin de qualité physique pour le combat.
Exemple 2 en rouge : une personne inactive physiquement qui veut retrouver une condition physique.

Se fixer quelques règles et ne pas les oublier (PTMPR).

• Règle 1 : la performance est prioritaire

Vous devez penser à la qualité première, celle qui vous fait défaut ou celle que vous voulez accentuer, peu importe, c'est elle la priorité. Les autres sont un choix par ordre de préférence, la dernière position est celle que l'on pourrait sacrifier sur une séance par manque de temps.

• Règle 2 : le temps est à la fois un ami et un ennemi

Je dispose de combien de temps pour m'entraîner ? Une fois par semaine, 2, 3, 4 ou plus ? 1 ou 2 heures ?

• Règle 3 : je dispose de quels moyens et quels matériels ?

Je dois me donner les moyens matériels ou de lieu pour obtenir mon objectif de performance.

• Règle 4 : la progression par étapes est à respecter
Il ne faut pas chercher la meilleure méthode pour développer des qualités physiques, mais enchaîner des méthodes de la plus facile à la plus difficile sans griller d'étapes. Vouloir mettre des charges lourdes sans bagages techniques ou en ayant un système musculaire non préparé engendre des blessures et retarde la progression. Et sachez que LA MEILLEURE METHODE ne fonctionne qu'un temps sur vous et qu'il faudra la changer. Cette méthode est peut-être aussi connue pour son efficacité, mais il est possible qu'elle ne fonctionne pas sur vous, c'est la notion d'individualité de l'entraînement.

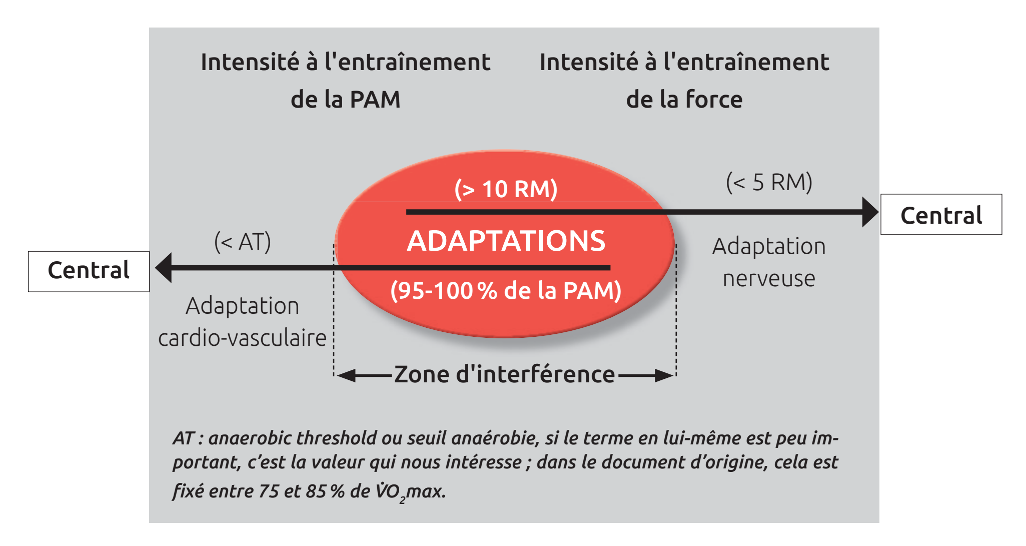
• Règle 5 : progresser c'est récupérer
Planifier les méthodes, c'est planifier de la récupération. Le corps se modifie la nuit, l'importance du sommeil est connue des culturistes. Laisser les tendons au repos durant une semaine ou en changeant le type de sollicitation est à penser (pédaler au lieu de courir…).

Peut-on développer toutes les qualités physiques en même temps ?

Le développement de la force et de l'endurance ne quitte pas la guerre froide entre les Russes (force) et les Américains (endurance). Ces 2 qualités physiques sont celles pour lesquelles les sportifs se posent le plus de questions, peut-on les développer en même temps ?

L'étude la plus connue est celle de Docherty et Sporer (2000), nous l'avons retrouvée dans plusieurs formations universitaires et plusieurs ouvrages, nous ne ferons pas exception. Le modèle tente de démontrer que certaines formes de travail sont à éviter si l'on veut maximiser les résultats. Voici la manière dont il faudrait imaginer et garder en tête les compatibilités et incompatibilités de travail associé. Le corps semble avoir du mal à répondre physiologiquement à certaines stimulations simultanément. Si le surentraînement semble simpliste pour expliquer ce manque de gain dans la zone d'interférence, on peut aussi se dire qu'il est difficile au corps de pouvoir répondre à plusieurs adaptations de "reconstruction". Les cel-

lules et l'ADN font ce qu'ils peuvent ! L'endurance a tendance à modifier les molécules liées à la mitochondrie, et les exercices d'hypertrophie les molécules myofibrillaires (et d'autres). Trop de modifications pour que les gains soient optimisés.



AT : anaerobic threshold ou seuil anaérobie, si le terme en lui-même est peu important, c'est la valeur qui nous intéresse ; dans le document d'origine, cela est fixé entre 75 et 85 % de $\dot{V}O_2$max.

Un travail de cardio-training modéré avec du travail de masse musculaire

=

compatible

Un travail de cardio-training modéré avec du travail de force

=

compatible

Un travail de cardio-training intense avec du travail de masse musculaire

=

à éviter

Un travail de cardio-training intense avec du travail de force

=

compatible

Bien qu'un travail de force soit compatible avec du travail en endurance modéré, celui qui cherchera la performance devra limiter son travail de cardio-training, car à long terme, l'endurance n'est pas optimale pour la force (mais rappelons de nouveau que nous parlons ici de performance pour de la compétition).

Depuis cette étude, d'autres ont cherché à cautionner ou invalider le modèle. Une méta-analyse est parue en 2012 (Loenneke et Anderson), nous vous en faisons un bilan.

Force et endurance peuvent se développer en même temps, mais la puissance musculaire fait tampon et diminue, attention aux priorités. Si l'explosivité reste la priorité, il faut limiter le développement de la force et de l'endurance simultanément. Lorsqu'un sportif recherche de la force et de la masse musculaire, l'entraînement en endurance doit être le plus proche possible de son activité afin de lui faire faire ce qu'il connaît, il n'est pas question de chercher un nouveau stress. Un hockeyeur devra faire du vélo et non courir par exemple.

L'endurance supérieure à 20-30 minutes et plus de 3 fois par semaine altère les autres qualités musculaires. Il vaudra mieux pratiquer des efforts intermittents, même pour la perte de poids (comme déjà vu), les résultats seront supérieurs. Lorsque l'endurance est l'activité principale, le développement de la force ne perturbe en rien cette dernière.

Synthèse des qualités physiques exprimées dans l'ouvrage

Nous proposons de petites synthèses de points importants avant de développer des séances à titre d'exemples.

Endurance

- Endurance sportive : faculté à maintenir l'intensité d'actions musculaires optimales durant un temps défini ou pour un objectif fixé, exceptionnellement, le temps est indéterminé.

- Il faut à la fois que les cellules puissent être mieux oxygénées, mais également qu'elles utilisent mieux cet oxygène.
- Améliorer l'endurance inclut améliorer son VO2max, donc sa PAM ou sa VAM.
- Pour le coureur ou le sportif, l'économie de locomotion est importante, l'entraînement de l'endurance devra être le plus souvent possible proche de la pratique afin de développer une technique efficace, rentable.
- L'utilisation de la fréquence cardiaque est une bonne méthode pour commencer. Il faut utiliser les bonnes formules, celle de Gellish pour déterminer la fréquence cardiaque maximale (206.9 – 0.67 x age) et Karvonen [FC d'entraînement = % de VO2max voulu x (FC max –FC de repos) + FC de repos] pour l'utilisation de cette dernière. Il est ainsi possible de progresser en augmentant de 5 % chaque semaine en fonction des progrès.
- Il existe tellement de méthodes différentes, des classiques ou plus "modernes". Choisissez celle qui vous convient.
- S'entraîner 2 à 3 fois par semaine suffit amplement à l'amélioration de l'endurance, 8 à 10 semaines est déjà un volume d'entraînement important et sûrement suffisant pour des résultats.
- Avec un niveau sportif, une aide sur l'endurance pourrait être d'incorporer des séances de 4 à 7 accélérations maximales de 10 à 30 secondes avec 3 à 4 minutes de récupération passive ou très peu active (séance de 30 minutes au maximum).

Perte de poids

- Se référer dans le cadre d'une performance sportive au % de graisse que l'on peut obtenir par la mesure des pinces ou par balance à impédance-métrie.
- Les hommes ne devraient pas dépasser 10 % de graisse et les femmes 20 %, toujours dans le cadre d'une optimisation de la performance sportive.
- Le mythe des 40 ou 45 minutes pour commencer à consommer des graisses doit être effacé des esprits, le corps consomme des graisses au repos et à l'exercice. De plus, le raisonnement simpliste ne reflète pas les résultats, ce n'est pas la consommation de graisse à l'exercice qui est intéressante mais la consommation d'énergie totale.

- Des intensités moyennes (moins de 75 % du VO2max) demandent 150 minutes d'efforts cumulés par semaine minimum pour obtenir des résultats.
- Sur des efforts plus intenses, 75 minutes peuvent suffire en appliquant l'autre principe, celui de ne rien manger de sucré dans l'heure suivante.
- L'alimentation est indissociable de l'objectif, on ne peut pas rouler vite sur les plus belles routes en jetant du sable dans le réservoir.
- L'intermittent est très efficace dans la perte de poids. Des efforts importants de 10 à 30 secondes à intensité supérieure au $\dot{V}O_2$max (4 à 7 répétitions) avec récupération de 1 à 4 minutes entre les blocs sont une solution parmi d'autres.

Force maximale

- Force maximale musculaire (FMM) : moyen mis en jeu par le muscle pour offrir la plus grande tension myotendideuse possible. (Cela passe par la contraction musculaire, la mise en jeu des structures élastiques du muscle, le système neuroendocrinien,... comme évoqué plus haut).
- La force peut améliorer l'endurance, l'explosivité et bien d'autres qualités.
- Les jeunes peuvent pratiquer la musculation en suivant un apprentissage technique, une progression et en étant suivis par un entraîneur qualifié.
- Évitez un déficit de force entre vos membres supérieur à 20 %.
- Les méthodes de force sont nombreuses, l'utilisation d'un régime de contraction musculaire offre des intérêts à choisir en fonction de vos objectifs.
- 2 fois par semaine le même groupe musculaire est suffisant.

Explosivité

- L'explosivité est la capacité d'un sujet à produire la plus grande accélération pour des actions telles que les lancers, les sauts, exprimer une partie de la vitesse...
- Son secteur énergétique privilégié est l'anaérobie alactique, surtout sur des efforts de moins de 6 secondes.
- Le développement de cette qualité physique est sûrement le plus important à prendre en compte dans le domaine sportif.

- Il est essentiel de développer la force afin de ne pas être limité dans le développement de l'explosivité.
- 4 secteurs de force ont été identifiés :

– Force	**85 à 120 %**
– Puissance force	**70 à 45 %**
– Puissance vitesse	**45 à 30 %**
– Secteur vitesse explosivité	**< 30 %**

- Entraîner l'explosivité ne doit pas se faire au détriment de la force (Bulgare, rappel de force...).
- Faire de la qualité et non de la quantité.
- En musculation, une séance type serait 6 répétitions à 30 % espacées de 10s entre chaque exécution, 3 séries, peut-être 5, arrêter lorsqu'il y a une baisse de performance. 2 min entre les séries…
- La pré-activation est un moyen d'accéder aux réserves de force.
- La potentiation dure 10 à 18 min.
- L'excentrique et la pliométrie trouvent leurs puissances dans l'étirement du muscle qui permet à la deuxième tête de myosine de ponter.
- Le travail d'explosivité recule le freinage trop précoce des antagonistes (cf. débutant).
- Il faut donc renforcer les antagonistes dans la phase excentrique rapide.
- Pour exprimer l'explosivité, il est possible de fatiguer les antagonistes.
- L'amélioration de l'explosivité passe par des schémas moteurs complexes, la qualité de l'exercice permet de mémoriser les bons schémas.
- Physiologiquement, la recherche nous dit qu'il y a un élargissement de la plaque motrice, un recrutement spécifique des fibres…

Vitesse

Lors de la course :

- Le muscle grand fessier empêche le bassin de pivoter et inverse le mouvement de la cuisse.
- Les petit et moyen fessiers assurent la stabilité latérale du bassin.
- Les ischio-jambiers bloquent le genou, ils ont l'action la plus longue.
- Les adducteurs maintiennent la cuisse dans l'axe pour contrecarrer l'action du GF.
- Les quadriceps empêchent que l'on s'écroule lors de l'appui au sol.
- L'ilio-psoas est le fléchisseur de hanche le plus puissant.

- La musculation est un travail essentiel à la vitesse pour dépasser ses limites.
- Le travail des sauts et des foulées bondissantes aide au développement de la force spécifique du plus dur au plus rapide.
- La vitesse est épuisante pour le système nerveux. Faire assez peu de longue distance.
- Les tensions musculaires étant importantes, les séances ne doivent pas dépasser 200 à 400 m pour les disciplines non spécialistes.
- L'énergétique de la vitesse est spécifique (cf. Volkov et Di Prempero).
- 2 – 8 s, 10 – 70 m, r = 20 s à 3 min, x 4, r = 7 à 10, x 4.
- Le poids est un facteur limitant, 10 % de masse grasse max.
- Le temps de réaction ne s'entraîne pas indéfiniment.
- L'entraînement des sports collectifs demande une analyse plus fine (vitesse acyclique).

Masse musculaire

- L'augmentation de la masse musculaire et/ou du volume musculaire d'une partie du corps est le résultat de l'épaississement des fibres musculaires existantes ainsi que leur augmentation en nombre.
- Cette adaptation du tissu musculaire est la conséquence de méthodes orientées provoquant des contraintes mécaniques, un manque d'oxygène durant un court instant, une réponse hormonale favorable. Certains éléments pris individuellement ne suffisent pas à créer cette hypertrophie.
- Bien qu'il existe de nombreuses méthodes, ce compromis se retrouve plus facilement dans les protocoles entre 8 et 12 répétitions maximales.
- 2 à 4 séries par muscle suffisent à stimuler ce dernier.
- Un minimum de 7 semaines est nécessaire avant que le muscle réagisse favorablement.

Souplesse

- L'assouplissement est bien la faculté d'augmenter son amplitude articulaire, il faut le distinguer des étirements de préparation à l'effort ou de récupération.

- S'il fallait résumer, 2 à 3 répétitions par jour de 30 secondes, 2 à 3 fois par semaine.
- Au-delà de 5 répétitions, pas de baisse de raideur musculaire, mais gain d'amplitude jusqu'à 10 répétitions.
- Les étirements à l'échauffement ne sont pas nuisibles à la performance.

Équilibre

- Notre capacité à rester en équilibre est liée aux yeux, aux capteurs de la peau (sous les pieds), aux capteurs des muscles, tendons et articulations (capteurs de la proprioception) et de l'appareil vestibulaire.
- Dans le cadre d'une préparation physique, ce que nous conseillons, c'est de rendre le corps indépendant de la vision pour l'équilibre, cela "libère" un sens et peu prévenir des blessures.
- Éviter de travailler trop longtemps sur cette qualité, vous risqueriez de perdre dans les domaines plus importants comme la force, la puissance.
- Une progression des exercices serait :

  – support stable et yeux ouverts
  – support stable et yeux fermés
  – support instable et yeux ouverts
  – support instable et yeux fermés

Gainage

- Le gainage du corps permet de mieux transmettre les forces, son amélioration engendre des gains de performance et limite l'apparition de blessures.
- Il existe 3 formes de gainage (voire 4), statique, d'apesanteur et de mouvement (ou dynamique). Nous considérons que l'interaction mouvement-apesanteur est à prendre en compte
- Il faut redonner priorité à la contraction des muscles lombo-abdominaux. Parfois, trop de temps est passé au développement de la force des membres supérieurs et inférieurs en "oubliant" de solliciter ceux qui permettent un lien entre ce haut et ce bas.
- Les exercices sur surface instable ou en stabilité perturbée (en appui monopodal) offrent de bons résultats.

2 • Exemples de progression sur les différentes qualités physiques

Endurance (les progressions proposées p. 162 et 171 sont déjà très convenables)

Niveau 1	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Débutant	Amélioration de l'endurance	2 à 3 fois par semaine	30 à 60 min
Semaine 1			
Lundi	Sur un stade, faire le tour en 2 min à 2min30 (donc entre 12 km/h et 9.5 km/h) puis faire 200 m (moitié de stade) en 2min30 (dans les 5 km/h). Répétez 5 fois le bloc. Total de 600 m x 5 = 3 000 m dont 2 000 m à courir		
Jeudi	Refaire la même séance		
Semaine 2			
Lundi	Idem avec un bloc de plus (3 600 m au total)		
Mercredi	Idem		
Vendredi	Faire une sortie vélo de 45 min avec une intensité moyenne (13/20). 20 min dans une direction, 25 min pour rentrer.		
Semaine 3			
lundi	Faire 2 tours de stade en 5 min et 200 m en marchant (2min30) Répétez 6 fois le bloc. Total de 1 000 m x 6 = 6 km dont 4.8 km à courir		
Mercredi	Une course continue de 30 min à rythme modéré, aisance respiratoire (test de la parole positif, 14-15/20)		
Vendredi	Sortie vélo de 50 min avec intensité moyenne (14/20).		
Semaine 4			
Lundi	Faire 2 tours de stade en 5 min et 200 m en marchant (2min30) Répétez 6 fois le bloc. Total de 1 000 m x 6 = 6 km dont 4.8 km à courir		
Mercredi	Une course continue de 30 min à rythme plus soutenu, l'aisance respiratoire n'est plus présente (16/20).		
Vendredi	Sortie vélo de 60 min avec intensité moyenne (14/20).		
Semaine 5			
Lundi	Idem avec un bloc de plus (7 km au total)		
Mercredi	Une course continue de 20 min, pose de 3 min puis 20 min de nouveau, essoufflement souhaité (à la limite de l'inconfort) (17/20 si possible)		
Vendredi	Faire une sortie vélo de 45 min avec une intensité moyenne (14/20). 20 min dans une direction, 25 min pour rentrer.		
Semaine 6			
lundi	Faire 2 tours de stade et une moitié en marchant, augmentez légèrement l'intensité.		
Mercredi	Une course continue de 30 min à rythme soutenu, (15-16/20)		
Vendredi	Sortie vélo de 50 min avec intensité moyenne (14/20).		

Niveau 2	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Entraîné	Amélioration de l'endurance et du VO2max	2 à 3 fois par semaine	40 min à 1h30 min
Semaine 1			
Lundi	Après échauffement (10 min à 65 % de VAM), IT 30/30 durant 8 minutes puis 20 minutes d'endurance foncière (même intensité que l'échauffement). L'intermittent 30/30 : 30 s de course à 120 % de VAM puis 30 s en passif. 8 répétitions.		
Jeudi	Idem		
Semaine 2			
Lundi	Idem		
Mercredi	Après échauffement (10 min à 65 % de VAM), 4 min à 100 % de VAM, repos de 3 min, 8 min à 90 %, repos de 3 min, 18 min à 70 %. Séance difficile.		
Vendredi	Faire une sortie vélo de 35 min avec une intensité importante (17/20).		
Semaine 3			
Lundi	Après échauffement (10 min à 65 % de VAM), IT 30/30 durant 8 minutes puis repos de 3 min, refaire un bloc (3 bloc en tout si possible) ; idéalement, faire une durée proche de 2.5 fois votre Tlim.		
Mercredi	Sortie vélo de 50 min avec intensité moyenne.		
Vendredi	Refaire la séance du lundi		
Semaine 4			
Lundi	Après échauffement (10 min à 65 % de VAM), IT 30/20 durant 6 minutes puis prendre 3 min de repos, faire 3 blocs. L'intermittent 30/20 : 30 s de course à 120 % de VAM puis 20 s en passif.		
Mercredi	Sortie vélo d'une heure en rythme modéré.		
Vendredi	Après échauffement (10 min à 65 % de VAM), IT 30/20 durant 6 minutes puis prendre 3 min de repos, faire 3 blocs. L'intermittent 30/20 : 30 s de course à 120 % de VAM puis 20 s en passif.		
Semaine 5			
Lundi	Après échauffement (10 min à 65 % de VAM), 20 min à 85 %, repos de 6 min puis refaire le même bloc.		
Mercredi	Vélo 50 min à intensité moyenne		
Vendredi	Après échauffement (10 min à 65 % de VAM), 20 min à 85 %, repos de 6 min puis refaire le même bloc.		
Semaine 6			
Lundi	Après échauffement (10 min à 65 % de VAM), 2 min à 110 % de la VAM, repos de 2 min (passif ou actif à 60 %), faire 5 fois le bloc.		
Mercredi	Sortie de 20 min à intensité importante puis 30 min à faible intensité.		
Vendredi	Après échauffement (10 min à 65 % de VAM), 2 min à 110 % de la VAM, repos de 2 min (passif ou actif à 60 %), faire 5 fois le bloc.		

Niveau 3	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Sportif	Amélioration de l'endurance et du VO2max pour un sport	2 à 3 fois par semaine	30 min à 1h

Semaine 1	
Lundi	Après échauffement (5 min à 65 % de VAM), 20 min à intensité moyenne.
Jeudi	Idem
Semaine 2	
Lundi	Après échauffement (5 min à 65 % de VAM), IT (120 %) 30/30 durant 8 minutes puis repos de 3 min ; refaire un bloc (3 blocs en tout si possible) ; idéalement, faire une durée proche de 2.5 votre Tlim.
Mercredi	Après échauffement (5 min à 65 % de VAM), IT (120 %) 15/15 durant 8 minutes puis repos de 3 min ; refaire un bloc (3 blocs en tout si possible) ; idéalement, faire une durée proche de 2.5 votre Tlim.
Vendredi	Après échauffement (5 min à 65 % de VAM) + exercice de sollicitation des ischio-jambiers et psoas (montées de genoux, course jambes tendues) durant 5 min, faire des sprints de 20 m, récupération de 1 min ; le faire 20 fois.
Semaine 3	
Lundi	Sur vélo, échauffement de 5 min (à 65 % de PAM), pédaler 30s avec une intensité en watts très importante (supra maximale), puis durant 3min30, pédalez à 50 RPM avec le minimum de watts. Faire le bloc 5 fois.
Mercredi	Même séance que lundi
Vendredi	Même séance que lundi
Semaine 4	
Lundi	Sur vélo, échauffement de 5 min (à 65 % de PAM), pédaler 20 s à 170 % de PAM puis 10 s de repos. Faire 8 répétitions + 20 min à 70 % de PAM.
Mercredi	Même séance que lundi
Vendredi	Même séance que lundi
Semaine 5	
Lundi	Sur vélo, échauffement de 5 min (à 65 % de PAM), pédaler 30s avec une intensité en watts très importante, puis durant 3min30, pédalez à 50 RPM avec le minimum de watts. Faire le bloc 5 fois.
Mercredi	Sur vélo, échauffement de 5 min (à 65 % de PAM), pédaler 20 s à 170 % de PAM puis 10 s de repos. Faire 8 répétitions + 20 min à 70 % de PAM.
Vendredi	Même séance que vendredi
Semaine 6	
Lundi	Après échauffement (5 min à 65 % de VAM), IT (120 %) 30/30 durant 8 minutes puis repos de 3 min, refaire un bloc de 15/15 durant 6 min, repos de 3 min puis refaire un bloc de 10/10 durant 6 min. Idéalement, faire une durée proche de 2.5 votre Tlim.
Mercredi	Même séance que lundi
Vendredi	Après échauffement (5 min à 65 % de VAM), IT (120 %) 5/25 durant 10 minutes. Accélération maximale de 5 secondes, 25 secondes de récupération.

Perte de poids

Niveau 1	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Débutant	Perte de poids	2 à 3 fois par semaine	30 à 60 min
Semaine 1			
Lundi	Vélo ou tapis durant 15 min avec aisance respiratoire, marche rapide de 5 min, refaire 10 min.		
Jeudi	Refaire la même séance		
TOTAL	60 min d'activités physiques dans la semaine. Idéalement, ajouter d'autres activités.		
Semaines 2 et 3			
Lundi	Si pas de salle de fitness : alterner course modérée (14/20) et marche par période de 5 min. (5 min course + 5 min marche rapide) x 10		
Mercredi	Même séance		
Vendredi	Même séance		
TOTAL	150 min d'activités physiques dans la semaine. Idéalement, ajouter d'autres activités.		
Semaines 4 et 5			
Lundi	Échauffement de 2 min niveau articulation, faire 8 min de musculation poids de corps. 3 séries de 15 pompes sur les genoux ou les pieds ; entre les 3 séries, faire 15 flexions de jambes sans descendre trop bas, 90 ° au niveau des genoux, refaire une série de 15 flexions de jambes après la dernière série de pompes. Quelques exercices de gainage statique (en appui sur les avant-bras et les pieds pour commencer), 30 s dans les 4 positions (ventrale, dorsale, latérale droite et gauche). Enchaîner 25 min de course puis 15 min de marche rapide.		
Mercredi	Sortie vélo d'une heure		
Vendredi	Idem que lundi		
TOTAL	160 min d'activités physiques dans la semaine. Idéalement, ajouter d'autres activités.		

Niveau 2	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Entraîné	Perte de poids	3 à 5 fois semaine	30 à 60 min
Semaine 1			
Lundi	20 min à rythme soutenu (course, vélo ou autre activité cardio), 80 % de VO2max		
Mercredi	Après échauffement (65 % de $\dot{V}O_2$max, 5 min), (5 min à 90 % et 5 min à 60 %) X 4		
Jeudi	Idem que lundi		
TOTAL	85 dont 60 min à plus de 75 %		
Semaines 2 et 3			
Lundi	Après échauffement (65 % de $\dot{V}O_2$max, 5 min), (5 min à 90 % et 5 min à 60 %) X 4		
Mardi	Sur vélo, 30 min > 75 %		
Jeudi	Idem que lundi		
Vendredi	Idem que mardi		
TOTAL	150 min dont 100 min à plus de 75 %		
Semaines 4 et 5			
lundi	Après échauffement (65 % de $\dot{V}O_2$max, 5 min), échauffement de 5 min sur les membres inférieurs, 6 sprints à vitesse maximale de 15 m avec récupération de 30 s puis enchainer 20 min à 80 % de $\dot{V}O_2$max		
Mardi	Sur vélo, 30 min > 75 %		
Mercredi	Sur vélo, 30 min > 75 %		
Jeudi	Idem que lundi		
Samedi	Musculation de 30 min suivi d'un cardio de type Gibala (6 accélérations de 30 s espacées de 3 min).		
TOTAL	150 min à intensité suffisamment importante.		

Niveau 3

Un sportif ayant besoin de perdre du poids a surtout besoin de faire attention à son alimentation et rajoute en fin d'entraînement (3 à 4 fois par semaine) des exercices ayant une intensité importante durant 20 minutes environ. Quatre accélérations supra-maximales avec récupération de 30 s. Ne pas manger de sucre durant l'heure qui suit. Rien n'est magique, les résultats doivent apparaître. ATTENTION aux sucres cachés (glucose dans les jambons sous cellophane, sucres rajoutés dans les plats ou salades de restauration rapide...).

Force maximale

Niveau 1	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Débutant	Force	2 fois par semaine	40 min à 1h20
Semaine 1			
Lundi	Full-body : 2 séries par groupe musculaire, 10 répétitions par série, récupération de 1 min. Apprentissage des mouvements en priorité.		
Jeudi	Idem que lundi		
Semaines 2, 3 et 4			
Lundi	Full-body : 2 séries par groupe musculaire, 10 répétitions par série, récupération de 2 min. Ne pas "griller" les étapes, mettre plus lourd ne fera pas gagner davantage de force et pourrait engendrer une blessure. Il faut chercher à mettre légèrement plus lourd à chaque séance en étant capable d'effectuer les 10 répétitions. Pas d'échec musculaire souhaité, il faut sentir que vous pourriez faire 3 ou 4 répétitions après l'arrêt de la série.		
Mercredi	Idem que mercredi.		
Semaines 5, 6, 7 et 8			
lundi	Idem que le cycle précédent, en gardant les mêmes charges, cherchez une vitesse d'exécution rapide durant les phases concentriques. Récupération de 2min30 entre les séries si besoin.		
Mercredi	Idem que lundi		

Niveau 2	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Entraîné	Force	3 fois par semaine	30 à 60 min
Semaines 1 à 4			
Lundi	Full-body : Méthode stato-dynamique		
Mercredi	Full-body : Méthode sur 10 RM		
Jeudi	Full-body : Méthode stato-dynamique		
Semaines 5 à 9			
Lundi	Full-body : Méthode sur 6 RM		
Mardi	Full-body : Effort dynamique (50 % à vitesse maximale)		
Jeudi	Full-body : Méthode sur 6 RM		
Semaines 10 à 14			
lundi	Full-body : Méthode sur 3 RM		
Mardi	Full-body : Méthode super slow		
Mercredi	Full-body : Méthode sur 3 RM		

Niveau 3	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Sportif	Force	3 à 5 fois par semaine	30 à 60 min
Semaines 1 à 4			
Lundi	Full-body ou région concernée par le travail. Méthode Bulgare (3 RM + 5 répétitions explosives. 2 séries maximum par exercice.		
Jeudi	Idem que lundi		
Semaines 5 à 8			
Lundi	Full-body, isométrie max (3 répétitions à 110 % + 6 répétitions dynamiques à 50 %) 2 séries maximum par exercice.		
Jeudi	Idem que lundi		
Semaines 9 à 13			
Lundi	Full-body ou région concernée par le travail. 6 RM en recherchant une "vitesse" dans la phase concentrique.		
Jeudi	Idem que lundi		

Explosivité

Ce chapitre démontre une progression adaptable par tous. TRÈS IMPORTANT, ne pas oublier que pour créer de l'explosivité, il faut une accélération maximale. Cela nécessite un apprentissage, mais le lâcher de barre au développé couché est une étape importante à connaître. Un livre ne peut pas vous démontrer une bonne exécution, il faut être encadré pour cette action. Le lancer de médecine-ball ou autre engin lesté est à pratiquer ainsi que les jumps.

La **qualité** doit rester le repère de la séance !

Vitesse

Cette qualité demande bien plus de traitement que nos tableaux, c'est seulement une idée de progression très générale.

Niveau 1	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Débutant	Vitesse	2 fois par semaine	40 min et plus
Semaines 1 à 4			
Lundi	Échauffement de 15 min (talons cuisses, montées de genoux, travail sur les ischios, psoas). Accélération de 20 m, en faire 10 avec récupération de 1 min.		
Mercredi	Séance de musculation, reprendre la même séance que la progression sur la force maximale semaine 1 à 4.		
vendredi	Même séance que lundi		
Semaines 5 à 9			
Lundi	Échauffement de 15 min (talons cuisses, montées de genoux, travail sur les ischios, psoas). Accélération de 30 m, en faire 10 avec récupération de 2 min.		
Mercredi	Musculation orientée sur les membres inférieurs. Effort dynamique, 2 séries par exercice.		
Vendredi	Même séance que lundi		
Semaines 10 à 14			
Lundi	Échauffement de 15 min (talons cuisses, montées de genoux, travail sur les ischios, psoas). Accélération de 40 à 80 m, en faire 10 avec récupération de 3 min.		
Mercredi	Séance de musculation orientée vers le membre inférieur, isométrie maximale (20 secondes + 6 répétitions en dynamique par série (2 séries par exercice).		
Vendredi	Même séance que lundi		

La vitesse reste particulière et très dépendante des niveaux et objectifs. Proposer des exemples sans contexte est peu intéressant.

Pensez surtout à travailler en côte, achetez du matériel pour tenter le travail de survitesse, les parachutes sont intéressants, les traîneaux...

Pour les sports collectifs, pensez à ne pas trop vous focaliser sur le travail en ligne droite.

Masse musculaire

Niveau 1	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Débutant	Masse musculaire	2 fois par semaine	40 à 60 min

Semaine 1	
Lundi	Full-body : 2 séries par groupe musculaire, 10 répétitions par série, récupération de 1 min. Apprentissage des mouvements en priorité.
Jeudi	Idem que lundi
Semaines 2 à 5	
Lundi	Full-body : 2 séries par groupe musculaire, 10 répétitions par série, récupération de 2 min. Ne pas "griller" les étapes, mettre plus lourd ne fera pas gagner davantage de force et pourrait engendre une blessure. Il faut chercher à mettre légèrement plus lourd à chaque séance en étant capable d'effectuer les 10 répétitions. Pas d'échec musculaire souhaité, il faut sentir que vous pourriez faire 3 ou 4 répétitions après l'arrêt de la série.
Mercredi	Idem que mercredi.
Semaines 6 à 9	
lundi	Idem que le cycle précédent en cherchant l'échec musculaire (avec partenaire)
Mercredi	Sortie vélo d'une heure

Niveau 2	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Entraîné	Masse musculaire	4 fois par semaine	60 min à 1h30

Semaines 1 à 4	
Lundi	Cuisses, fessiers, adducteurs, épaules. Méthode sur 10 RM, 3 ou 4 séries par exercice.
Mercredi	Pecs, dos, bras (pec et dos sont amplement cumulables dans une même séance).
Jeudi	Idem que lundi
Vendredi	Idem que mercredi
Semaines 5 à 9	
Lundi	Même organisation que le cycle précédent avec une méthode dégressive
Mardi	Même organisation
Jeudi	Même organisation
Vendredi	Même organisation
Semaines 10 à 14	
lundi	Même organisation que le cycle précédent avec une méthode d'isotrophie
Mardi	Même organisation
Mercredi	Même organisation
Vendredi	Même organisation

Niveau 3	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Sportif	Masse musculaire	2 fois par semaine	40 à 60 min
Semaines 1 à 4			
Lundi	Muscle concerné, 3 séries par exercice, 12 RM, récupération de 2 min.		
Jeudi	Même séance		
Semaines 5 à 9			
Lundi	Muscle concerné, 3 séries par exercice, 10 RM, récupération de 2 min.		
Jeudi	Même séance		
Semaines 10 et 14			
Lundi	Muscle concerné, 3 séries par exercice, (dégressif, 4 RM + 2 RM + 2 RM + 2 RM), récupération de 2 min.		
Jeudi	Même séance		

Souplesse

Ce protocole a également été utilisé pour l'amélioration de l'amplitude de l'écart dans le plan frontal (grand écart facial). L'alternance peut être modulée en fonction du ressenti de l'athlète.

Niveau 1	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Débutant à entraîné	Amélioration écart antéro-postérieur pour chaque jambe	2 à 3 fois par semaine	8-14 minutes de temps effectif
Semaine 1			
Lundi	Étirement statique : 2 x [5 x 30 s] ; r = 2 s ; R = 30 s (r = récupération entre étirements ; R = récupération entre exercices) sur ilio-psoas et quadriceps gauche-droit et ischio-jambiers gauche-droit		
Jeudi	Étirement statique : 3 x [3 x 30 s] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Semaine 2			
Lundi	Étirement statique : 2 x [6 x 20 s] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Jeudi	Étirement statique : 3 x [4 x 20 s] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Semaine 3			
Lundi	Étirement "Contracter-relâcher" : 2 x [3 x (5 s contraction + 20 s relax)] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Jeudi	Étirement "Contracter-relâcher" : 2 x [5 x (5 s contraction + 15 s relax)] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Vendredi	Étirement "Contracter-relâcher" : 3 x [3 x (5 s contraction + 20 s relax)] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Semaine 4			
Lundi	Étirement "Contracter-relâcher" : 2 x [3 x (5 s contraction + 20 s relax)] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Jeudi	Étirement "Contracter-relâcher" : 3 x [5 x (5 s contraction + 15 s relax)] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Vendredi	Étirement "Contracter-relâcher" : 2 x [6 x (5 s contraction + 20 s relax)] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		

Niveau 2	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Entraîné à sportif	Amélioration écart antéro-postérieur pour chaque jambe	3 fois par semaine	8-15 min de temps effectif
Semaine 1			
Lundi	Étirement "Contracter-relâcher" : 3 x [4 x (5 s contraction + 15 s relax)] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Mercredi	Étirement "Contracter-relâcher" : 2 x [8 x (5 s contraction + 20 s relax)] ; r = 2 s (même commentaire)		
Vendredi	Étirement "Contracter-relâcher" : 3 x [4 x (5 s contraction + 20 s relax)] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Semaine 2			
Lundi	Étirement "Contracter-relâcher" : 2 x [6 x (5 s contraction + 15 s relax)] ; r = 2 s (même commentaire)		
Mercredi	Étirement "Contracter-relâcher" : 3 x [4 x (5 s contraction + 20 s relax)] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Vendredi	Étirement "Contracter-relâcher" : 3 x [3 x (5 s contraction + 25 s relax)] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Semaine 3			
Lundi	Étirement "contraction antagoniste" : 4 x [2 x 35 s relax-contraction] ; r = 5 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Mercredi	Étirement "contraction antagoniste" : 3 x [3 x 25 s relax-contraction] ; r = 5 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Vendredi	Étirement "contraction antagoniste" : 2 x [6 x 30 s relax-contraction] ; r = 5 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Semaine 4			
Lundi	Étirement "contraction antagoniste" : 4 x [3 x 30 s relax-contraction] ; r = 5 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Mercredi	Étirement "contraction antagoniste" : 2 x [6 x 30 s relax-contraction] ; r = 5 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Vendredi	Étirement "contraction antagoniste" : 1 x [4 x 90 s relax-contraction] ; r = 5 s ; R = 30 s (même commentaire)		

Niveau 3	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Sportif	Amélioration écart antéro-postérieur pour chaque jambe	3 fois par semaine	8-15 min de temps effectif
Semaine 1			
Lundi	Étirement "Contracter-relâcher" : 2 x [6 x (5 s contraction + 15 s relax)] ; r = 2 s (même commentaire) Étirement "Contracter-relâcher" : 3 x [4 x (5 s contraction + 20 s relax)] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Jeudi	Étirement "Contracter-relâcher" : 3 x [3 x (5 s contraction + 25 s relax)] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Semaine 2			
Lundi	Étirement "contraction antagoniste" : 2 x [3 x 20 s relax-contraction] ; r = 5 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Mercredi	Étirement "contraction antagoniste" : 2 x [3 x 20 s relax-contraction] ; r = 5 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Vendredi	Étirement "contraction antagoniste" : 2 x [6 x 15 s relax-contraction] ; r = 5 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Semaine 3			
Lundi	Étirement "Contracter-relâcher-contraction antagoniste / CRAC" : 2 x [3 x (5 s contraction + 15 s relax-contraction] ; r = 5 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Mercredi	Étirement "CRAC" : 2 x [3 x (5 s contraction + 15 s relax-contraction] ; r = 5 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Vendredi	Étirement "contraction antagoniste" : 2 x [6 x 15 s relax-contraction] ; r = 5 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Semaine 4			
Lundi	Étirement "CRAC" : 4 x [2 x (5 s contraction + 20 s relax-contraction] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Mercredi	Étirement "CRAC" : 3 x [3 x (5 s contraction + 30 s relax-contraction] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		
Vendredi	Étirement "CRAC" : 2 x [5 x (5 s contraction + 40 s relax-contraction] ; r = 2 s ; R = 30 s (même commentaire)		

Équilibre

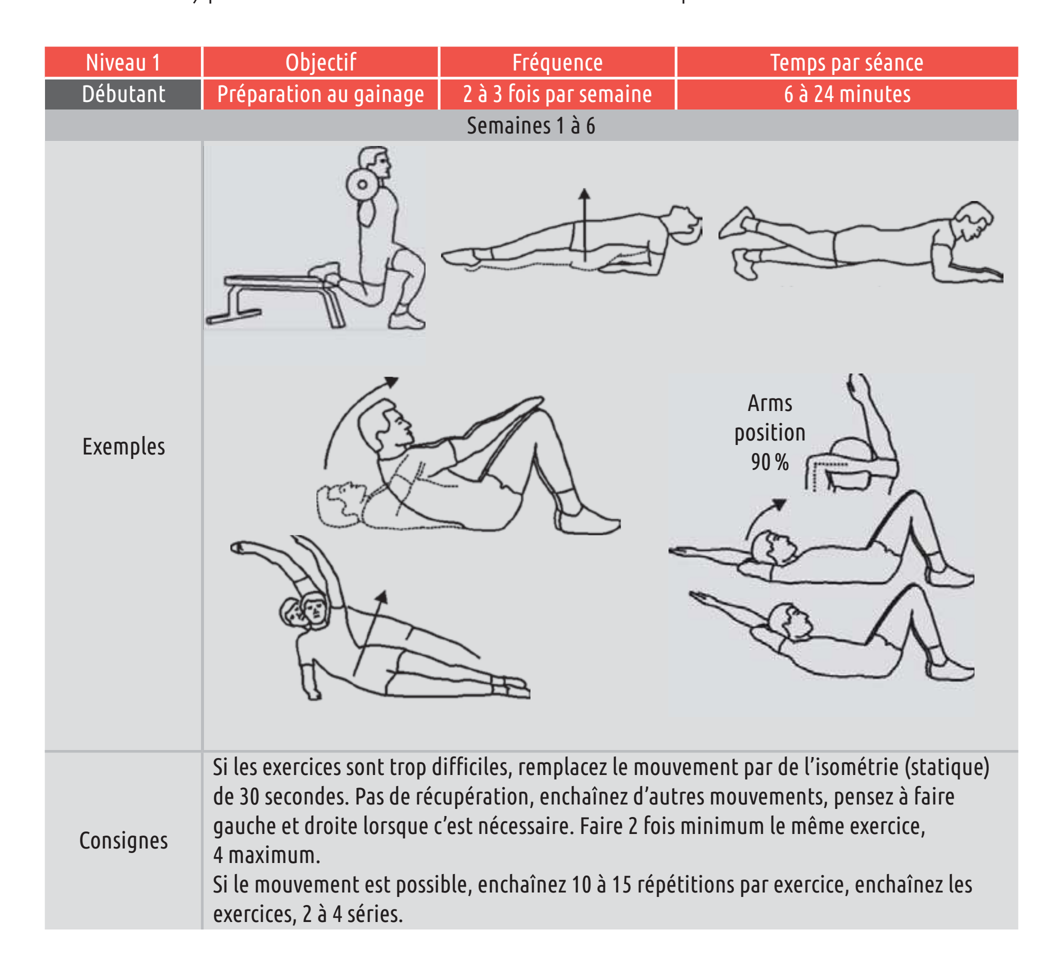
Niveau 1	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Débutant à entraîné	Amélioration équilibre unipodal	2 à 3 fois par semaine	15 à 20 min de temps effectif
Semaine 1			
Lundi	4 x [(2 x 20 s) + (4 x 15 s) + (6 x 10 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Sur un pied nu, les yeux ouverts, mains sur les hanches, sur le sol. Faire la même chose de l'autre pied. Recommencer la série avec les yeux fermés.		
Jeudi	Même séance que lundi		
Semaine 2			
Lundi	2 x [(2 x 40 s) + (4 x 25 s) + (6 x 15 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Même commentaire concernant conditions et matériel.		
Jeudi	Même séance que lundi		
Semaine 3			
Lundi	2 x [(2 x 60 s) + (4 x 30 s) + (8 x 15)] ; r = 5 ; R = 30 s Même commentaire concernant conditions et matériel.		
Jeudi	Même séance que lundi		
Semaine 4			
Lundi	2 x [(2 x 40 s) + (4 x 25 s) + (6 x 15 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Même commentaire concernant matériel mais sur support instable (par ordre de difficulté : Balance-Pad Airex®, Bosu®).		
Jeudi	Même séance que lundi		
Vendredi	3 x [(2 x 60 s) + (4 x 30 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Même commentaire concernant matériel mais sur support instable (par ordre de difficulté : Balance-Pad Airex®, Bosu®).		

Niveau 2	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Intermédiaire à sportif	Amélioration équilibre unipodal	2 à 3 fois par semaine	15 à 20 min de temps effectif
Semaine 1			
Lundi	4 x [(2 x 20 s) + (4 x 15 s) + (6 x 10 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Sur un pied nu, les yeux ouverts mains sur les hanches avec support instable (par ordre de difficulté : Bosu®, Waff® medium). Faire la même chose de l'autre pied. Recommencer la série avec les yeux fermés.		
Jeudi	Même séance que lundi		
Semaine 2			
Lundi	2 x [(2 x 40 s) + (4 x 25 s) + (6 x 15 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Sur un pied nu, les yeux ouverts mains sur les hanches avec support instable (par ordre de difficulté : Bosu®, Waff® medium). Faire la même chose de l'autre pied. Recommencer la série avec les yeux fermés.		
Jeudi	Même séance que lundi		
Semaine 3			
Lundi	2 x [(2 x 60 s) + (4 x 30 s) + (8 x 15)] ; r = 5 ; R = 30 s Sur un pied nu, les yeux ouverts mains sur les hanches avec support instable (par ordre de difficulté : Bosu®, Waff® medium). Faire la même chose de l'autre pied. Recommencer la série avec les yeux fermés.		
Jeudi	Même séance que lundi		
Semaine 4			
Lundi	2 x [(2 x 40 s) + (4 x 25 s) + (6 x 15 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Sur un pied nu, les yeux ouverts mains sur les hanches avec support instable (par ordre de difficulté : Balance-Pad Airex®, Bosu®). Faire la même chose de l'autre pied. Recommencer la série avec les yeux fermés.		
Mercredi	Même séance que lundi		
Vendredi	2 x [(2 x 40 s) + (4 x 25 s) + (6 x 15 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Sur un pied nu, les yeux ouverts mains bras croisés sur la poitrine avec support instable (par ordre de difficulté : Waff® medium, Waff® pro medium). Faire la même chose de l'autre pied. Recommencer la série avec les yeux fermés.		

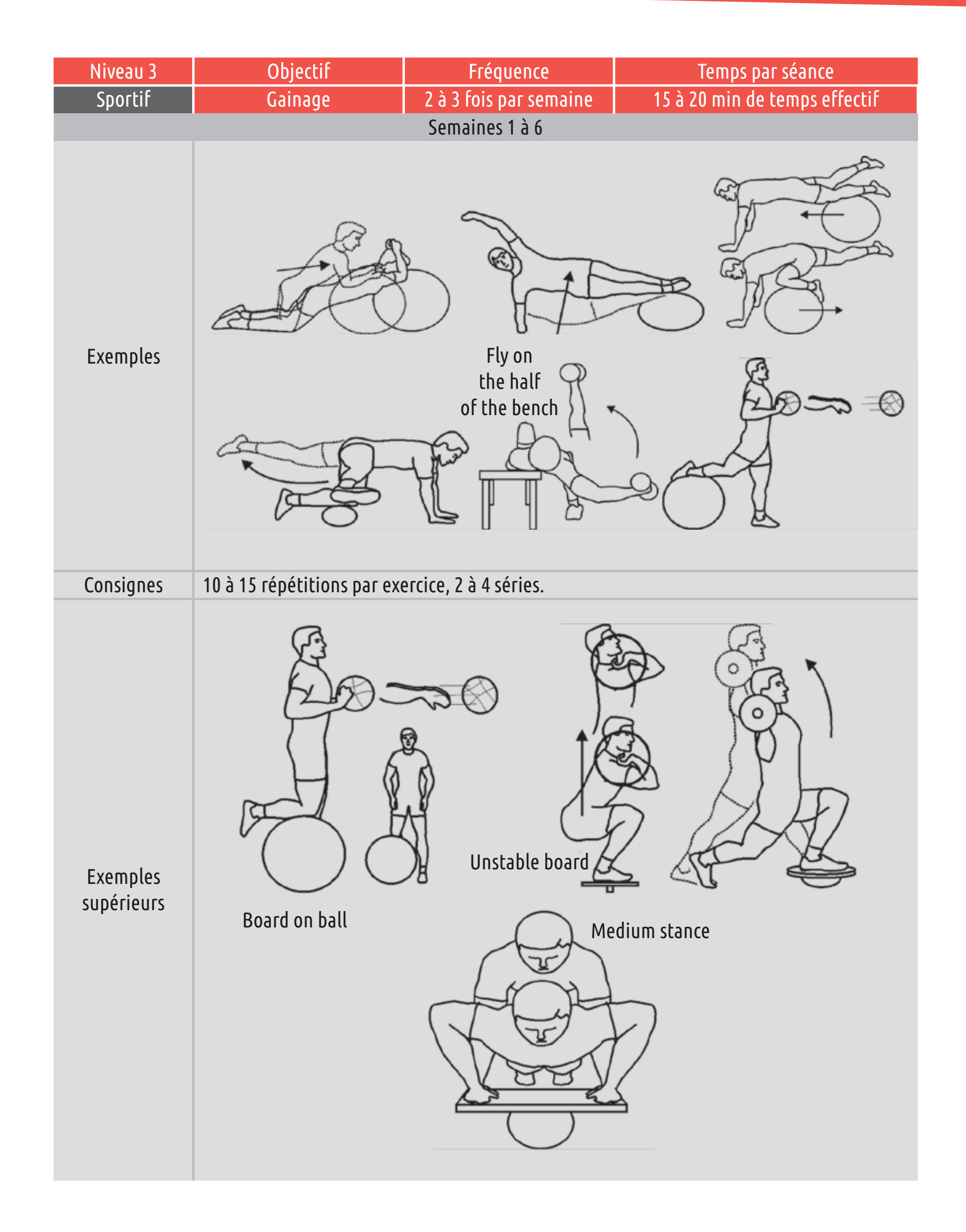
Niveau 3	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Sportif	Amélioration équilibre unipodal	3 fois par semaine	15 à 20 min de temps effectif
Semaine 1			
Lundi	[2 x (2 x 60 s)] + [2 x (4 x 30 s)] + [3 x (8 x 15)] ; r = 5 ; R = 30 s Sur un pied nu, les yeux ouverts mains bras croisés sur la poitrine avec support instable (par ordre de difficulté : Balance-Pad Airex®, Bosu®). Faire la même chose de l'autre pied. Recommencer la série avec les yeux fermés.		
Mercredi	[2 x (2 x 60 s)] + [2 x (4 x 30 s)] + [3 x (8 x 15)] ; r = 5 ; R = 30 s Même commentaire concernant les conditions d'exécution et le matériel.		
Vendredi	[2 x (3 x 60 s)] + [2 x (6 x 30 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Même commentaire concernant les conditions d'exécution et le matériel.		
Semaine 2			
Lundi	[2 x (3 x 60 s)] + [2 x (6 x 30 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Même commentaire concernant les conditions d'exécution et le matériel.		
Mercredi	[1 x (2 x 90 s)] + [1 x (4 x 45 s)] + [1 x (8 x 30 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Même commentaire concernant les conditions d'exécution avec Balance-Pad Airex®, Bosu®		
Vendredi	Même séance que mercredi		
Semaine 3			
Lundi	[1 x (3 x 90 s)] + [1 x (6 x 45 s)] + [1 x (9 x 30 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Même commentaire concernant les conditions d'exécution avec Bosu® ou Waff® medium		
Mercredi	[1 x (2 x 90 s)] + [1 x (4 x 45 s)] + [1 x (8 x 30 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Même commentaire concernant les conditions d'exécution avec Waff® pro medium		
Vendredi	[1 x (2 x 90 s)] + [1 x (4 x 45 s)] + [1 x (8 x 30 s)] ; r = 5 ; R = 30 s Même commentaire concernant le matériel mais avec les bras tendus à la verticale en tenant un ballon léger.		
Semaine 4			
Lundi	Même séance que vendredi mais la jambe libre tendue devant puis derrière (20-30° environ) en alternant toutes les 5 secondes.		
Mercredi	Même séance que vendredi mais en introduisant des perturbations extérieures comme taper dans le pied, le genou, le ballon…		
Vendredi	Même séance que mercredi avec un maximum de répétitions les yeux fermés.		

Gainage

Les exercices de gainage sont sans limites, c'est l'épuisement de votre imagination qui peut vous limiter. Pour y pallier, l'ouvrage d'Olivier Pauly sur le gainage (Amphora) ou les DVD de Bruno Parietti (Gainage, spécial Swissball) peuvent être d'excellentes sources d'inspiration.

Niveau 1	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Débutant	Préparation au gainage	2 à 3 fois par semaine	6 à 24 minutes
Semaines 1 à 6			
Exemples			
Consignes	Si les exercices sont trop difficiles, remplacez le mouvement par de l'isométrie (statique) de 30 secondes. Pas de récupération, enchaînez d'autres mouvements, pensez à faire gauche et droite lorsque c'est nécessaire. Faire 2 fois minimum le même exercice, 4 maximum. Si le mouvement est possible, enchaînez 10 à 15 répétitions par exercice, enchaînez les exercices, 2 à 4 séries.		

Niveau 2	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Entraîné	Gainage	2 à 3 fois par semaine	15 à 20 min de temps effectif
Semaines 1 à 6			
Exemples	Press on the half of the bench Left leg Right arm		
Consignes	10 à 15 répétitions par exercice, 2 à 4 séries.		



Niveau 3	Objectif	Fréquence	Temps par séance
Sportif	Gainage	2 à 3 fois par semaine	15 à 20 min de temps effectif
Semaines 1 à 6			
Exemples			
Consignes	10 à 15 répétitions par exercice, 2 à 4 séries.		
Exemples supérieurs			

Nous vous conseillons la visite de l'excellent site www.physigraphe.com pour l'achat des images pour construire vos séances. C'est une source de plus de 4000 images et 2000 animations qui permettront d'illustrer vos séances. Un exemple de ces illustrations est donné par les trois programmes précédents.

Des séances mixtes (FORCE – EXPLOSIVITÉ – ENDURANCE…)

Si vous voulez être bon partout, même s'il faut choisir des priorités, vous pouvez très bien organiser des séances dites mixtes. Les sports collectifs ont cette problématique, être puissant, rapide et endurant. L'idéal reste de disposer des qualités "nerveuses" en début de séance, pour laisser la place éventuellement à du "tissulaire" et finir par l'endurance.

Les qualités physiques ont cette dualité nerveuse et tissulaire, nous cherchons à identifier la dominante afin de trouver des solutions de terrain.

Nerveuse : force, vitesse, explosivité, équilibre, gainage.
Tissulaire : masse musculaire, assouplissement.
Endurance : $\dot{V}O_2$max, perte de poids.

Les séances pouvant se créer à l'infini, nous démontrons un exemple mais il faudrait un autre ouvrage exclusivement de séances types pour satisfaire une majorité de lecteur.

Objectif	Force	Explosivité	Souplesse	Endurance à l'explosivité
Logiques	La force et l'explosivité peuvent se coupler avec du travail Bulgare. Le $\dot{V}O_2$max peut se travailler avec de l'IT, l'assouplissement est un travail de finition en fin de séance.			
Exemple de séance	(3 réps à 85 % + 5 réps à 30 %) x 3 séries (sur 2 groupes musculaires si besoin) Récupération de 3 min Intermittent : sur ergocycle (30 secondes en supra maximal puis 3min30 de récupération) x 4 séries. Assouplissement.			

Conclusion

Croyez-nous, construisez votre logique à partir des éléments décrits dans cet ouvrage plutôt que de rechercher des séances toutes faites. Il est difficile de trouver dans un livre ou sur la toile la séance type avec la planification qui correspond à vos besoins.

Nous avons gagné du temps le jour où les informations nous semblaient plus claires. C'est la définition de la compétence, des connaissances approfondies au service de l'application de terrain. L'observation de la réalité aide également dans la construction de son chemin. Les limites que l'on se fixe restent celles de notre imaginaire, les performances humaines sont incroyables !

Le développement des qualités physiques demande un ordre « logique », le qualitatif en premier. L'autre logique est la progression, la séance la plus difficile n'est pas forcément celle dont vous avez besoin. Obtenir une blessure ou une fatigue importante n'apporte rien de bon. L'augmentation brutale de la charge d'entraînement est un pari perdu d'avance !

La planification n'est pas obligatoirement un mythe mais n'est sûrement pas prévisible. Elle ne sera établie qu'une fois effectuée ! Finalement, l'important reste l'identification des objectifs et l'adaptation des séances à l'humeur, au temps, à la progression. Évidemment, il faut anticiper les prochaines semaines, mais il ne faut pas se projeter trop loin dans le temps.

Après des années passées à observer les sportifs et les étudiants en sciences du sport qui se blessent souvent, nous ne pouvons que vous conseiller de récupérer, récupérer, récupérer ! Nous ne nous répéterons jamais assez. Les sportifs sous nos ailes sont encadrés afin de limiter l'apparition de la fatigue. L'*over reaching* (fatigue passagère) est normal, l'*overtraining* (surentraînement) est une erreur. Le surentraînement est une fatigue chronique avec une diminution prolongée de la performance. Bien que difficile à anticiper biologiquement et avec des tests de terrain, la baisse de motivation passagère et des performances anormalement basses (contre-performances) devraient immédiatement vous alerter.

Une semaine complète de repos a parfois du bon, voire du très bon.

Bibliographie

• 1 • Abernethy PJ and Quigley BM. Concurrent Strength and Endurance Training of the Elbow Extensors. The Journal of Strength & Conditioning Research 7: 234-240, 1993.

• 2 • Baker D. The effects of an in-season of concurrent training on the maintenance of maximal strength and power in professional and college-aged rugby league football players. J Strength Cond Res 15: 172-177, 2001.

• 3 • Balabinis CP, Psarakis CH, Moukas M, Vassiliou MP, and Behrakis PK. Early Phase Changes by Concurrent Endurance and Strength Training. The Journal of Strength & Conditioning Research 17: 393-401, 2003.

• 4 • Bell G, Syrotuik D, Socha T, Maclean I, and Quinney HA. Effect of Strength Training and Concurrent Strength and Endurance Training on Strength, Testosterone, and Cortisol. The Journal of Strength & Conditioning Research 11: 57-64, 1997.

• 5 • Cadore EL, Izquierdo M, Santos MGd, Martins JB, Rodrigues Lhullier FL, Pinto RS, Silva RF, and Kruel LFM. Hormonal Responses to Concurrent Strength and Endurance Training with Different Exercise Orders. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 3281-3288 3210.1519/JSC.3280b3013e318248ab318226, 2012.

• 6 • Cadore EL, Pinto RS, Pinto SS, Alberton CL, Correa CS, Tartaruga MP, Silva EM, Almeida APV, Trindade GT, and Kruel LFM. Effects of Strength, Endurance, and Concurrent Training on Aerobic Power and Dynamic Neuromuscular Economy in Elderly Men. The Journal of Strength & Conditioning Research 25: 758-766 710.1519/JSC.1510b1013e318207ed318266, 2011.

• 7 • Chtara M, Chaouachi A, Levin GT, Chaouachi M, Chamari K, Amri M, and Laursen PB. Effect of Concurrent Endurance and Circuit Resistance Training Sequence on Muscular Strength and Power Development. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 1037-1045 1010.1519/JSC.1030b1013e31816a34419, 2008.

• 8 • Davis WJ, Wood DT, Andrews RG, Elkind LM, and Davis WB. Concurrent Training Enhances Athletes' Strength, Muscle Endurance, and Other Measures. The Journal of Strength & Conditioning Research 22: 1487-1502 1410.1519/JSC.1480b1013e3181739f3181708, 2008.

• 9 • Docherty D and Sporer B. A Proposed Model for Examining the Interference Phenomenon between Concurrent Aerobic and Strength Training. Sports Medicine 30: 385-394, 2000.

• 10 • Ferrauti A, Bergermann M, and Fernandez-Fernandez J. Effects of a Concurrent Strength and Endurance Training on Running Performance and Running Economy in Recreational Marathon Runners. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 2770-2778 2710.1519/JSC.2770b2013e3181d2764e2779c, 2010.

• 11 • Francesca PM, Giulia DI, Stefania C, Alessandro S, Gianluca V, and Antonio LT. Concurrent strength and endurance training effects on running economy in master endurance runners. The Journal of Strength & Conditioning Research Publish Ahead of Print: 10.1519/JSC.1510b1013e3182794485, 2012.

• 12 • Gallagher D, DiPietro L, Visek AJ, Bancheri JM, and Miller TA. The Effects of Concurrent Endurance and Resistance Training on 2,000-m Rowing Ergometer Times in Collegiate Male Rowers. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 1208-1214 1210.1519/JSC.1200b1013e3181d8331e, 2010.

• 13 • García-Pallarés J and Izquierdo M. Strategies to Optimize Concurrent Training of Strength and Aerobic Fitness for Rowing and Canoeing. Sports Medicine 41: 329-343 310.2165/11539690-000000000-000000000, 2011.

• 14 • Gergley JC. Comparison of two lower-body modes of endurance training on lower-body strength development while concurrently training. J Strength Cond Res 23: 979-987, 2009.

• 15 • Glowacki SP, Martin SE, Maurer A, Baek W, Green JS, and Crouse SF. Effects of resistance, endurance, and concurrent exercise on training outcomes in men. Med Sci Sports Exerc 36: 2119-2127, 2004.

• 16 • Gravelle BL and Blessing DL. Physiological Adaptation in Women Concurrently Training for Strength and Endurance. The Journal of Strength & Conditioning Research 14: 5-13, 2000.

• 17 • Leveritt M, Abernethy PJ, Barry B, and Logan PA. Concurrent Strength and Endurance Training: The Influence of Dependent Variable Selection. The Journal of Strength & Conditioning Research 17: 503-508, 2003.

• 18 • Leveritt M, Abernethy PJ, Barry BK, and Logan PA. Concurrent Strength and Endurance Training: A Review. Sports Medicine 28: 413-427, 1999.

• 19 • Levin GT, Mcguigan MR, and Laursen PB. Effect of Concurrent Resistance and Endurance Training on Physiologic and Performance Parameters of Well-Trained Endurance Cyclists. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 2280-2286 2210.1519/JSC.2280b2013e3181b2990c2282, 2009.

• 20 • McNamara JM and Stearne DJ. Effect of concurrent training, flexible nonlinear periodization, and maximal effort cycling on strength and power. J Strength Cond Res, 2012.

• 21 • Mikkola JS, Rusko HK, Nummela AT, Paavolainen LM, and Hakkinen K. Concurrent endurance and explosive type strength training increases activation and fast force production of leg extensor muscles in endurance athletes. J Strength Cond Res 21: 613-620, 2007.

• 22 • Mikkola JS, Rusko HK, Nummela AT, Paavolainen LM, and Häkkinen K. Concurrent Endurance and Explosive Type Strength Training Increases Activation and Fast Force Production of Leg Extensor Muscles in Endurance Athletes. The Journal of Strength & Conditioning Research 21: 613-620, 2007.

• 23 • Mosti MP, Wang E, Wiggen ON, Helgerud J, and Hoff J. Concurrent strength and endurance training improves physical capacity in patients with peripheral arterial disease. Scand J Med Sci Sports 21: e308-314, 2011.

• 24 • Sale DG, Jacobs I, MacDougall JD, and Garner S. Comparison of two regimens of concurrent strength and endurance training. Med Sci Sports Exerc 22: 348-356, 1990.

• 25 • Sale DG, MacDougall JD, Jacobs I, and Garner S. Interaction between concurrent strength and endurance training. J Appl Physiol 68: 260-270, 1990.

• 26 • Santos AP, Marinho DA, Costa AM, Izquierdo M, and Marques MC. The Effects of Concurrent Resistance and Endurance Training Follow a Detraining Period in Elementary School Students. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 1708-1716 1710.1519/JSC.1700b1013e318234e318872, 2012.

• 27 • Sedano S, Marín PJ, Cuadrado G, and Redondo JC. Concurrent training in elite male runners: The influence of strength versus muscular endurance training on performance outcomes. The Journal of Strength & Conditioning Research Publish Ahead of Print: 10.1519/JSC.1510b1013e318280cc318226, 2013.

• 28 • Shaw BS, Shaw I, and Brown GA. Comparison of Resistance and Concurrent Resistance and Endurance Training Regimes in the Development of Strength. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 2507-2514 2510.1519/JSC.2500b2013e3181bc2191e, 2009.

• 29 • Takeshima N, Rogers ME, Islam MM, Yamauchi T, Watanabe E, and Okada A. Effect of concurrent aerobic and resistance circuit exercise training on fitness in older adults. Eur J Appl Physiol 93: 173-182, 2004.

• 30 • Wilson JM, Marin PJ, Rhea MR, Wilson SMC, Loenneke JP, and Anderson JC. Concurrent Training: A Meta-Analysis Examining Interference of Aerobic and Resistance Exercises. The Journal of Strength & Conditioning Research 26: 2293-2307 2210.1519/JSC.2290b2013e31823a31823e31822d, 2012.

• 31 • Wong P-l, Chaouachi A, Chamari K, Dellal A, and Wisloff U. Effect of Preseason Concurrent Muscular Strength and High-Intensity Interval Training in Professional Soccer Players. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 653-660 610.1519/JSC.1510b1013e3181aa1536a1512, 2010.

• 32 • Wood RH, Reyes R, Welsch MA, Favaloro-Sabatier J, Sabatier M, Matthew Lee C, Johnson LG, and Hooper PF. Concurrent cardiovascular and resistance training in healthy older adults. Med Sci Sports Exerc 33: 1751-1758, 2001.

• 33 • Gerald V. Smith , Gad Alon , Steven R. Roys , Rao P. Gullapalli Détermination IRM fonctionnelle d'une relation dose-réponse au membre inférieur stimulation électrique neuromusculaire chez les sujets sains Mai 2003 , Volume 150 , Issue 1 , pp 33-39 Experimental Brain Research

• 34 • Kibi_sa, R, Gr_unovas, A, Poderys, J, and Gr_unovien _ e, D. Restoration of the work capacity of the skeletal muscle with electrical myostimulation. J Strength Cond Res 27(2): 449–457, 2013

15

Comment récupérer ?

Sommaire

1 • Introduction 607

2 • Les massages 608

Le flou artistique 609
Le post-exercice 610
L'étude qui sauve tout le monde 611
Conclusion 612

3 • La thérapie par le froid 612

Cryothérapie corps entier 612
Durée et protocoles pratiqués 613

4 • La variabilité de la fréquence cardiaque et la cohérence cardiaque 614

Variabilité 614
Cohérence 615

5 • Les techniques de relâchement musculaire 616

Grands principes 618
Les différentes régions cibles 619

Bibliographie 627

"L'excès de sommeil fatigue."
Homère, L'Odyssée, XV, 394 18

1 • Introduction

Nous nous plaisons à dire régulièrement que le meilleur entraîneur ou préparateur physique est celui qui sait gérer la récupération plus que tout autre chose. La bonne dose au bon moment. De nombreux ouvrages et articles ont été consacrés à cette thématique (5, 41, 61, 70, 75, 80, 85, 121, 125). Il n'est donc pas forcément prioritaire de lister tout ce qui a été dit mais plutôt ce qui est relativement efficace.

Le terme "relativement" est important car tout est une question d'ajustement entre charge d'entraînement et récupération. Ainsi, mieux on connaît l'effet induit par une séance, plus il sera facile de faire des recommandations sur ce qui semble le plus approprié pour "recharger les batteries". Lorsqu'on gère des athlètes qui font quasiment un entraînement par jour, c'est assez compliqué, alors à deux entraînements quotidiens, ça devient un casse-tête. Et si l'on a affaire à des jeunes (préadolescents notamment), nous nous orientons vers une terre inconnue... ou presque.

À cela s'ajoute la complexité de cette phase, par essence multifactorielle, puisque l'on peut tout aussi bien se pencher sur l'aspect physique, neurophysiologique ou cognitif de la récupération, trois piliers de la performance que nous avons évoqués dans le chapitre introductif de cet ouvrage. Qui plus est, on peut aussi distinguer les récupérations suite à la séance, entre les répétitions d'une série et entre les séries d'exercices elles-mêmes, enfin les récupérations entre les séances ou les cycles de séances (25).

À ce jour, il n'existe pas de recette miracle pour récupérer rapidement. Il existe même des différences interindividuelles importantes selon les modalités d'entraînement et les méthodes utilisées qui démontrent une nouvelle fois l'importance d'individualiser la récupération (45). L'expression "stratégie de récupération" est donc tout à fait appropriée. On doit construire une solution au cas par cas, solution amenée à évoluer tout au long de l'année en fonction des paramètres de suivi qui auront été mis en place.

Nous ne ferons pas un catalogue des méthodes de récupération largement analysées par d'autres. Nous donnerons simplement quelques exemples de sujets qui ont été étudiés pour illustrer ces trois piliers :

- **les aspects énergétiques ou nutritionnels** avec notamment la réplétion :
  - du stock de glycogène (12, 14, 22, 34, 47, 59, 73, 77, 112, 121, 136, 139, 143),
  - de phosphorylcréatine (13, 17, 23, 28, 65, 67, 72, 77, 99, 107-109, 111, 133-135) et,
  - de protéines post-exercice (20, 22, 24, 30, 33, 34, 55, 59, 65, 73, 76, 77, 79, 89, 92, 103, 106, 136, 143) ;
- **les méthodes pouvant limiter les courbatures** (déjà évoquées dans le chapitre sur la souplesse et la force) ou en atténuer les effets invalidants (22, 31, 58, 91, 101, 103, 104, 126, 131, 140) ;
- **les aspects neurophysiologiques** avec :
  - l'influence de la qualité du sommeil, de sa privation, de la perturbation des rythmes pendant les décalages horaires notamment sur des rythmes veille-sommeil et les régulations hormonales (1, 2, 8, 40, 46, 51, 87, 90, 93, 98, 120, 127, 137),
  - l'impact des massages et de l'électrostimulation sur la récupération musculaire voire l'antalgie ou la régénération tissulaire en cas de blessure (10, 14, 35, 67, 102, 121, 132, 141),
  - l'utilisation du froid pour atténuer les effets de la séance et accélérer les processus de récupération et de régénération (11, 42, 59, 71, 78, 94, 96, 100, 113, 114, 117, 123, 135, 138) ;
- **les aspects cognitifs** toujours par rapport au sommeil mais aussi dans le cadre de l'effort intense ou du surentraînement.

Vous l'aurez compris : les sujets sont d'une très grande richesse. Ce qui explique qu'il est difficile de tout maîtriser tant les choses évoluent vite dans ces différents domaines au niveau scientifique. Cela n'empêche pas la prudence face à toute nouvelle méthode ou mode qui viendrait au-devant de la scène sans qu'il y ait eu un effort de fait pour en vérifier la réelle efficacité et utilité.

Aussi, nous n'aborderons ici que certains aspects pratiques que nous utilisons nous-même assez souvent sur le terrain.

2 • Les massages

Les massages existent depuis longtemps (105). Malgré tout, l'intérêt dans la récupération sportive est encore controversé car les massages revêtent plusieurs aspects : biomécaniques, physiologiques, neurologiques, psychologiques (141). Des méta-analyses récentes éclairent nos pratiques de terrain dans le sens positif.

Le flou artistique

Les adeptes des massages prétendaient que ceux-ci étaient intéressants pour éliminer le lactate. Les études démontrent que cela n'a pas d'intérêt pour une double raison. Premièrement, il n'est pas intéressant d'éliminer le lactate (cf. chapitre sur l'endurance), ensuite les massages ne démontrent pas d'efficacité à drainer ces métabolites ou d'autres d'ailleurs (88, 122), notamment du fait de l'absence d'une efficacité avérée sur le flux sanguin (64, 130, 132, 141).

Cependant, ce n'est que récemment que l'utilité des massages a été démontrée dans le cas des courbatures et sur la diminution du stress post-exercice : ils ont une action directe sur un allègement de l'expression des marqueurs du système sympathique post-exercice. Leurs effets se mesurent par exemple dans la diminution d'une hormone du stress très connue, le cortisol, ou de l'insuline, sur la variabilité de la fréquence cardiaque dont nous parlerons plus loin (88). En revanche, il n'y a pas d'effet sur certains marqueurs de l'intensité des courbatures comme les neutrophiles (63).

Sur le plan thérapeutique, il y a eu des validations intuitives du massage qui n'ont pas été forcément démontrées par la suite. L'échauffement en est un bon exemple.

Ce que l'on entend souvent sur le terrain :

- relâchement musculaire ;
- élimination des tensions ;
- augmentation du débit sanguin et meilleur retour veineux.

Il faudrait donc l'intégrer dans les routines d'échauffement. Pour autant, cet aspect n'a pas été mis en évidence de façon systématique… c'est même le contraire qui a été mis en évidence lorsque le massage est utilisé seul (7, 44).
Cependant, en utilisant la technique du massage suisse (effleurage, friction, pétrissage, vibration et tapotement) combinée à des étirements statiques, il a été démontré une amélioration des performances de puissance (7). Ainsi, associé à d'autres méthodes, les choses sont un peu différentes.

Le post-exercice

Il en va de même pour ce qui se passe en post-exercice (124) comme par exemple pour les courbatures. En effet, il a été démontré soit des effets positifs, soit aucun effet, en fonction de la technique utilisée et du moment (36, 74, 97, 121).

Avec un protocole standard (technique suédoise classique) durant 20 minutes à post 48 heures, on montre qu'il existe des effets positifs sur l'intensité de la douleur (14, 121, 132) sans pour autant jouer sur la sensation d'inconfort et les perturbations de l'humeur causées par les courbatures. Ce protocole ne permet pas de modifier la concentration de neutrophiles plasmatiques ou encore d'accélérer la restauration de la force maximale, ou la souplesse. Le repos complet est aussi efficace (63).

Concernant la récupération en générale, il n'y a pas d'influence sur la performance, sur la concentration de lactate (62, 144).

Pour ce qui est de la récupération de la force maximale, il n'y a pas d'effet sur la chute de force induite par l'exercice intense.

Des effets psychologiques et immunitaires sont aussi démontrés comme (62, 86, 142, 148) :

- la réduction de l'intensité de la douleur après 48 heures de récupération ;
- la perception d'une amélioration de la récupération ;
- l'amélioration du sommeil ;
- l'augmentation du niveau d'endorphine et de sérotonine ;
- la réduction des hormones du stress.

Autre aspect positif démontré : un massage de 10 à 30 secondes de la jonction musculo-tendineuse (ischio semi-membraneux) augmente l'amplitude de mouvement de 6 à 7 % (30 secondes étant plus efficaces que 10 secondes) (69).

Les études qui sauvent tout le monde…

Plusieurs méta-analyses montrent que le massage apporte un plus… même si cela n'est pas toujours vérifié. Par exemple, l'une de ces analyses qui comprend 27 études, explique que 17 ne sont pas positives. Il reste tout de même 10 études démontrant un plus. Pour l'instant il est difficile de donner des recommandations sur une durée idéale, sur une technique plutôt qu'une autre, ni sur un moment opportun. Des études sont réalisées chez l'animal pour vérifier ces paramètres physiologiques de façon objective (21, 52-54, 150).

Les effets à retenir sont donc les suivants :

- la stimulation des nerfs entrerait en compétition avec la transmission nerveuse de la sensation de douleur ;
- le massage favoriserait l'activité du système nerveux parasympathique (associé au repos) au détriment du sympathique (associé à l'activité) ;
- l'augmentation de la quantité de sérotonine (neurotransmetteur qui inhibe la transmission de signaux de douleur au cerveau) participerait à la sensation de bien-être résultant d'un massage.
- L'augmentation de la densité de mitochondries.

Conclusion

Comme très souvent dans l'entraînement sportif, il y a une notion d'entraînabilité au sein de la population. Une technique positive pour A n'offre rien de plus pour B. Plus nous avons de cordes à notre arc, plus nous sommes en mesure de trouver satisfaction auprès des personnes que nous avons en charge.

3 • La thérapie par le froid

Plusieurs approches ont été explorées dans le domaine de la thérapie par le froid en post-exercice : le local et le global. Dans le local, il s'agit simplement d'appliquer une source de froid de façon directe (glace) ou indirecte (gaz) sur la zone cible. Dans le global, le contact avec le froid peut là aussi être direct en ce qui concerne l'immersion (eau inférieure à 10°C), ou indirect pour les chambres ou équipements producteurs d'une ambiance froide (température généralement inférieure à 100°C).

Concernant les aspects d'application locale, ils intéressent plus particulièrement les blessures en tant que telles.

En revanche, pour les expositions du corps entier soit par immersion, soit en étant dans une pièce ou une unité portable, on vise davantage la récupération physique tout comme la prévention de l'hyperthermie liée à l'exercice et/ou aux conditions météorologiques.

Cryothérapie corps entier

C'est une méthode qui a reçu une attention croissante chez les athlètes pour son impact supposé sur la récupération (11). Le traitement avec l'exposition totale du corps à des températures extrêmement basses a d'abord été introduit au Japon vers la fin des années 70 par Toshiro Yamauchi qui a construit la première chambre cryogénique et utilisé avec succès la cryothérapie pour traiter les rhumatismes (146).

Aujourd'hui c'est cet effet anti-inflammatoire qui intéresse le plus car l'exercice intense ou l'entraînement à haute dose induisent une augmentation des marqueurs de l'inflammation, pouvant nuire à la récupération globale du sujet.

Ce sont donc ces marqueurs qui sont le plus souvent utilisés dans les études pour mesurer les effets de cette méthode.

Les résultats obtenus à ce jour mettent de plus en plus souvent en évidence des bénéfices à exposer le corps à de très basses températures pendant de courtes périodes pour limiter le phénomène inflammatoire par la production de molécules appelées "interleukines". Il semble que cette exposition au froid polaire permette de récupérer de façon plus rapide comparée au simple repos ou à l'exposition aux infrarouges lointains (60, 119).

Les aspects délétères semblent peu nombreux puisque l'on note un effet antioxydant (43, 95, 145), et une absence d'influence sur la proprioception (38).

C'est donc une méthode à surveiller pour voir comment les protocoles vont évoluer afin de proposer une optimisation, voire une individualisation des séances en fonction des paramètres physiologiques qui auront été obtenus dans l'entraînement.

Durée et protocoles pratiqués

Le protocole INSEP concerne l'immersion en chambre d'air refroidi. Deux et quatre minutes dans une chambre à – 110° C, après avoir traversé successivement pour s'habituer deux salles à –10° C et – 60° C. Durant ce temps, le sportif marche tranquillement et reste en contact permanent (visuel et sonore) avec un opérateur. La séance doit toujours rester confortable et ne pas être douloureuse. C'est le sportif qui détermine l'arrêt de la séance avant de ressortir à la température ambiante par le même chemin.

Le protocole par immersion dans l'eau froide est différent, il se vend des petits bains gonflables.

Analgésiants

- Bain froid de 6 à 15 minutes selon les sensations et la température utilisée. Immersion totale ou partielle possible.
- Température de l'eau : entre 10 et 13° C. L'effet antalgique intervient en dessous de 13,6° C.
- Effet : douleur bloquée et endorphines sécrétées.

Récupération Physique

- À pratiquer derrière un match ou une compétition.
- Reprendre le protocole antalgique.

À pratiquer derrière un entraînement léger ou une séance de musculation

- Séance : douche avant utilisation, une minute de bain froid et deux minutes de bain ou douche chauds. Se détendre au maximum. Répéter trois à quatre fois. Terminer toujours par le froid.
- Température des bains : chaud 38 ° C , froid 14 ° C.
- Effet : facilite le relâchement des contractions musculaires, limite la phase inflammatoire due à l'excrétion de médiateurs.

4 • La variabilité de la fréquence cardiaque et la cohérence cardiaque

Variabilité

L'analyse de la fréquence cardiaque a connu un regain d'intérêt lorsqu'a été introduit ce que l'on appelle l'étude des domaines de fréquences, en particulier par l'utilisation d'outils mathématiques comme les transformées de Fourier (3, 9, 110).

La fréquence cardiaque est loin d'être un métronome. Il existe des différences de délai (mesurées en millisecondes) entre chaque battement de cœur. Elles témoignent de la double influence nerveuse au niveau cardiaque : sympathique et parasympathique, l'accélérateur et le frein. Un très bon article de M. Buccheit (32), dont nous donnons le lien[37], résume cette méthode. L'analyse de cette différence, ou variabilité, permet d'identifier la prévalence de l'un et/ou l'autre de ces deux systèmes.

L'intérêt pour cette variabilité vient de ce que l'on souhaiterait éviter plus : le surentraînement (15, 16, 26, 56, 116, 118, 128). Si l'utilisation de la variabilité de la fréquence permettait de l'éviter, alors on pourrait mieux doser le travail et mieux gérer la fatigue (27, 81-83)… et donc la récupération.

À ce jour, se dégage une orientation positive à l'utilisation de cet index sur le terrain. À notre connaissance, il n'existe qu'un seul cardiofréquencemètre sur le marché capable de mesurer la fréquence cardiaque battement par battement et de donner accès rapidement à cette variabilité y compris chez les enfants (48, 49). Nous utilisons indifféremment un petit logiciel libre de droits ou un simple tableur pour faire les analyses mathématiques de cette variabilité dans notre accompagnement d'athlètes ou de particuliers afin de dégager l'impact des charges de travail sur plusieurs semaines ou plusieurs mois, car seul le suivi permet de fournir une information valide en association avec d'autres paramètres (29, 83, 84). Une calibration en relation avec les postures au repos peut s'avérer nécessaire pour individualiser encore plus le suivi (115).

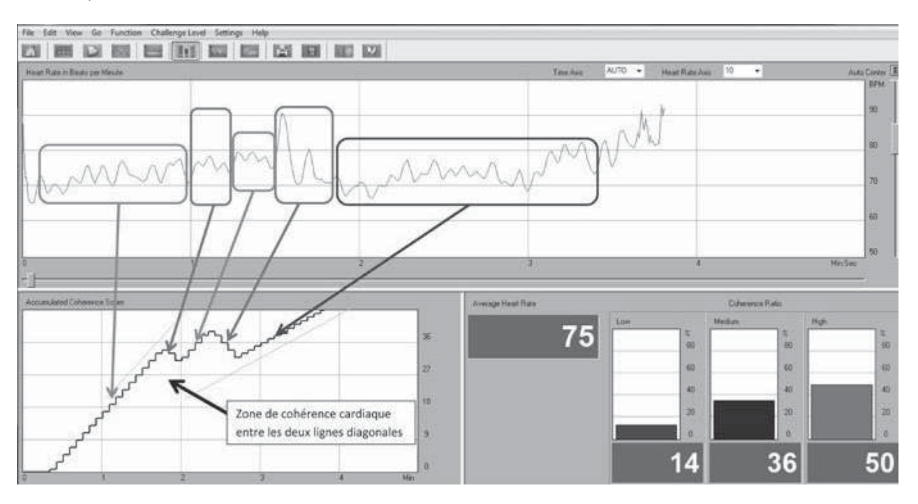
Cohérence

En ce qui concerne la cohérence cardiaque, il s'agit d'utiliser "simplement" le lien nerveux direct entre cerveau et cœur. On sait l'effet d'un stress (cause) sur le rythme cardiaque (effet), mais on utilise moins souvent l'inverse : agir sur le rythme cardiaque et sa variabilité pour influencer l'état dans lequel on est. On mobilise les mêmes outils que ceux de la variabilité

37) http://www.martin-buchheit.net/Recherche/M.%20Buchheit%20-%20Utilisation%20de%20la%20VFC%20chez%20le%20sportif%20-%20C&S7.pdf

de la fréquence cardiaque mais en temps réel. Entrer en cohérence, c’est tout simplement limiter l’influence des effets négatifs de la situation actuelle ou d’une séance précédente ou d’une compétition à venir.

Un exemple d’enregistrement est donné ci-dessous montrant la réactivité de ce paramètre en fonction du contexte.



Mise en pratique : sur le dos, essayez de caler l'inspiration sur 5 s. Idem pour l'expiration, le tout durant 3 minutes, cela fait 6 cycles ventilatoires par minute, soit 18 cycles en 3 minutes.

5 • Les techniques de relâchement musculaire

Dans le chapitre sur la souplesse, nous avons évoqué l’évolution de nos connaissances sur les tissus présents dans le muscle, en particulier les fascias, et le regain d’intérêt concernant leur structure et surtout leur rôle dans la biomécanique du corps et les relations inter-membranes autant que inter-organiques.
Cet énorme réseau de tissu conjonctif qui parcourt notre corps et met en relation quelquefois des points très distants peut être mis en tension par

des muscles. Parfois, ce tissu composé de collagène (du grec kolla "colle") entraîne des adhérences suite à une cicatrisation consécutive à des micro-traumatismes. Ces adhérences génèrent une gêne que l'on nomme "nœud musculaire". Il est possible également que le nœud musculaire soit une activité électrique locale que l'on peut observer avec des instruments adaptés. Le muscle est donc en légère contraction telle une contracture musculaire dite "classique".

Au-delà de l'utilisation des étirements que nous avons évoqués dans le chapitre sur la souplesse, il existe des méthodes dont celles des points de relâchement ou points gâchette musculaires (*triggers points,* les nœuds musculaires que l'on ressent ; voir pages 625 et 626) dont les effets thérapeutiques ont été largement illustrés (4, 6, 18, 19, 39, 50, 57, 66, 129, 147). Leurs mécanismes commencent à être élucidés ; ils reposent sur des effets connus depuis longtemps en acupuncture (37, 68, 149). Leur connaissance peut présenter un réel bénéfice dans la phase de récupération post-exercice ou entre les séances d'entraînement lorsque l'on souhaite rapidement diminuer les tensions musculaires résiduelles ou soulager certaines régions qui ont été fortement sollicitées. Récemment, il a été démontré qu'ils pouvaient être inclus dans l'échauffement (152).

Nous résumons ci-après les principes à retenir de cette méthodologie de récupération qui, si elle vous intéresse, devra faire l'objet d'une formation spécifique pour en maîtriser parfaitement les aspects. L'une des références à ce jour dans ce domaine reste John Sharkey (151).

De manière synthétique, nous avons regroupé quelques techniques pour démontrer une partie des possibilités d'automassage ; le livre ne serait pas suffisant pour tout démontrer. La logique reste la même pour des muscles non présentés sur les pages suivantes ; masser la région douloureuse en respectant les grands principes énoncés ci-dessous.

Régions présentées :

1 Région de la jambe face postérieure
2 Région de la jambe face antérieure
3 Région de la jambe face latérale
4 Région de la cuisse face antérieure
5 Région de la cuisse face latérale
6 Région de la cuisse face médiale
7 Région abdominale
8 Région pelvienne face postérieure
9 Région du tronc face antéro-supérieure
10 Région du tronc face latéro-supérieure

Grands principes

Objectifs

- Augmenter l'élasticité au sein des groupes musculaires et dans une zone du corps.
- Restaurer l'intégrité structurelle.
- Cibler et casser les adhérences du tissu conjonctif.
- Redonner la posture la plus neutre possible en exploitant une biomécanique positive.
- Laisser fonctionner un muscle de manière optimale.

Bien mémoriser que

- L'élément clé est d'utiliser les bons outils et de faire des respirations profondes par le nez.
- Le groupe musculaire doit être relaxé durant la manipulation.
- Après les répétitions, marcher et bouger permet de mieux faire circuler le sang dans les zone massées.
- Le sang et l'oxygène redonnent l'élasticité au muscle.
- Pour de meilleurs gains, faites les exercices avant et après l'activité et 1 h 30 avant d'aller dormir.

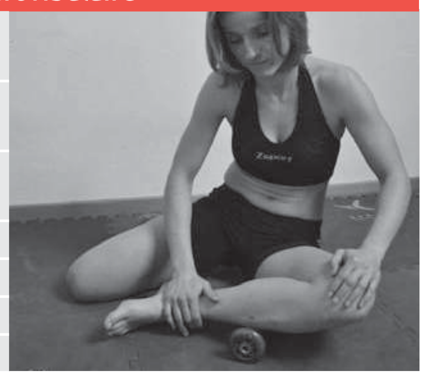
Les différentes régions cibles

1 • RÉGION DE LA JAMBE FACE POSTÉRIEURE Le triceps sural			
Footballer	Footballer et Baller Block	Progression 1	2 cercles avec le pied sur la droite
		Progression 2	2 cercles avec le pied sur la gauche
		Progression 3	4 flexions et extensions avec le genou (ascenceur)
		Progression en position neutre, basculer à droite puis gauche si besoin	
		Se lever et marcher	
		Test : rebond sur une jambe et équilibre	
		Répéter sur l'autre jambe	
Single Ball	TP Ball et Baller Block	Progression 1	4 X flex-Ext
		Progression 2	2 X cercles pied droit
		Progression 3	2 X cercles pied gauche
		Progression en position neutre, basculer à droite puis gauche si besoin	
		Se lever et marcher	
		Test : rebond sur une jambe et équilibre	
		Répéter sur l'autre jambe	
Double ball	2 TP Balls	Progression 1	2 x pivoter
		Progression 2	2 x avant arrière
		Légèrement repositionner et répéter le tout	
		Se lever et marcher	
		Test : saut une jambe	
		Répéter sur l'autre jambe	

2 • RÉGION DE LA JAMBE FACE ANTÉRIEURE
Tibial antérieur et long extenseur des orteils

Jambe antérieure	TP Ball	Progression 1	4 X pivoter	
		Progression 2	2 X cercles avec le pied droit et gauche	
		Progression 3	2 x lever les orteils et lâcher brusquement 2 secondes	
		Légèrement repositionner et refaire		
		Se lever et marcher		
		Test : sauter sur une jambe		
		Répéter sur l'autre jambe		

3 • RÉGION DE LA JAMBE FACE LATÉRALE
Le long fibulaire et court fibulaire

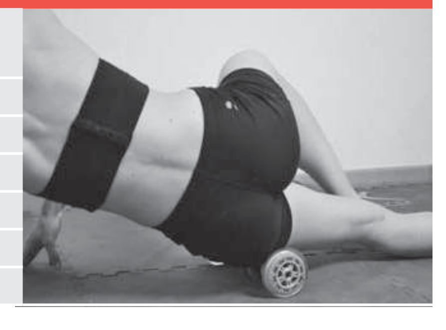
Jambe partie latérale	Footballer	Progression 1	2 cercles avec le pied sur la droite	
		Progression 2	2 cercles avec le pied sur la gauche	
		Alternance	4 flexions et extensions avec le genou	
		Repositionner avec une torsion vers le bas		
		Se lever et marcher		
		Test : équilibre		
		Répéter sur l'autre jambe		

4 • RÉGION DE LA CUISSE FACE ANTÉRIEURE
Le quadriceps

Quadriceps 0°	Quadballer	Progression 1	4 x 1 s avant, ½ retour
		Progression 2	2 x cross friction
		Progression 3	2 x 45° genou
		Répéter la progression 4 fois	
Quadriceps 45°	QuadballerTest	Progression 1	4 x 1 sec avant, ½ retour
		Progression 2	2 x cross friction
		Progression 3	2 x 45° genou
		Répéter la progression 4 fois	
		Se lever et marcher	
		Test : faire du tapping rapide	
		Répéter la progression 4 fois	

5 • RÉGION DE LA CUISSE FACE LATÉRALE
Le tenseur du fascia lata

Quadriceps 90°	Quadballer	Progression 1	4 x 1 s avant, ½ retour
		Progression 2	2 x cross friction
		Progression 3	2 x 45° genou
		Répéter la progression 4 fois	
		Se lever et marcher	
		Test : tapping rapide	
		Répéter sur l'autre cuisse	



6 • RÉGION DE LA CUISSE FACE MÉDIALE Le gracile (ancien droit interne) et le sartorius			
Quadriceps Médial et adducteurs	Quadballer	Progression 1	4 x avant arrière
		Progression 2	2 x cross frictions
		Progression 3	2 x lever la jambe
		Répéter 4 fois la progression	
		Se lever et marcher	
		Test : tapping rapide	
		Répéter sur l'autre cuisse	

7 • RÉGION ABDOMINALE L'ilio-psoas			
Psoas	TP Ball	Progression 1	2 x avant arrière
		Progression 2	2 x latéralement
		Progression 3	2 x avant arrière avec jambe surélevée
		Répéter la progression	
		Se lever et marcher	
		Test : montée de genou rapide	
		Répéter sur l'autre côté	

8 • RÉGION PELVIENNE FACE POSTÉRIEURE
Le piriforme (ancien pyramidal)

Piriforme	TP Ball	Progression 1	4 x glisser latéralement
		Progression 2	2 x avant arrière
		Progression 3	2 x pivoter le corps
		Répéter la progression 2 fois	
		Se lever et marcher	
		Test : monter le genou et faire une rotation	
		Répéter sur l'autre fesse si besoin	
		Répéter la progression 4 fois	

9 • RÉGION DU TRONC FACE ANTÉRO-SUPÉRIEURE
Le grand pectoral

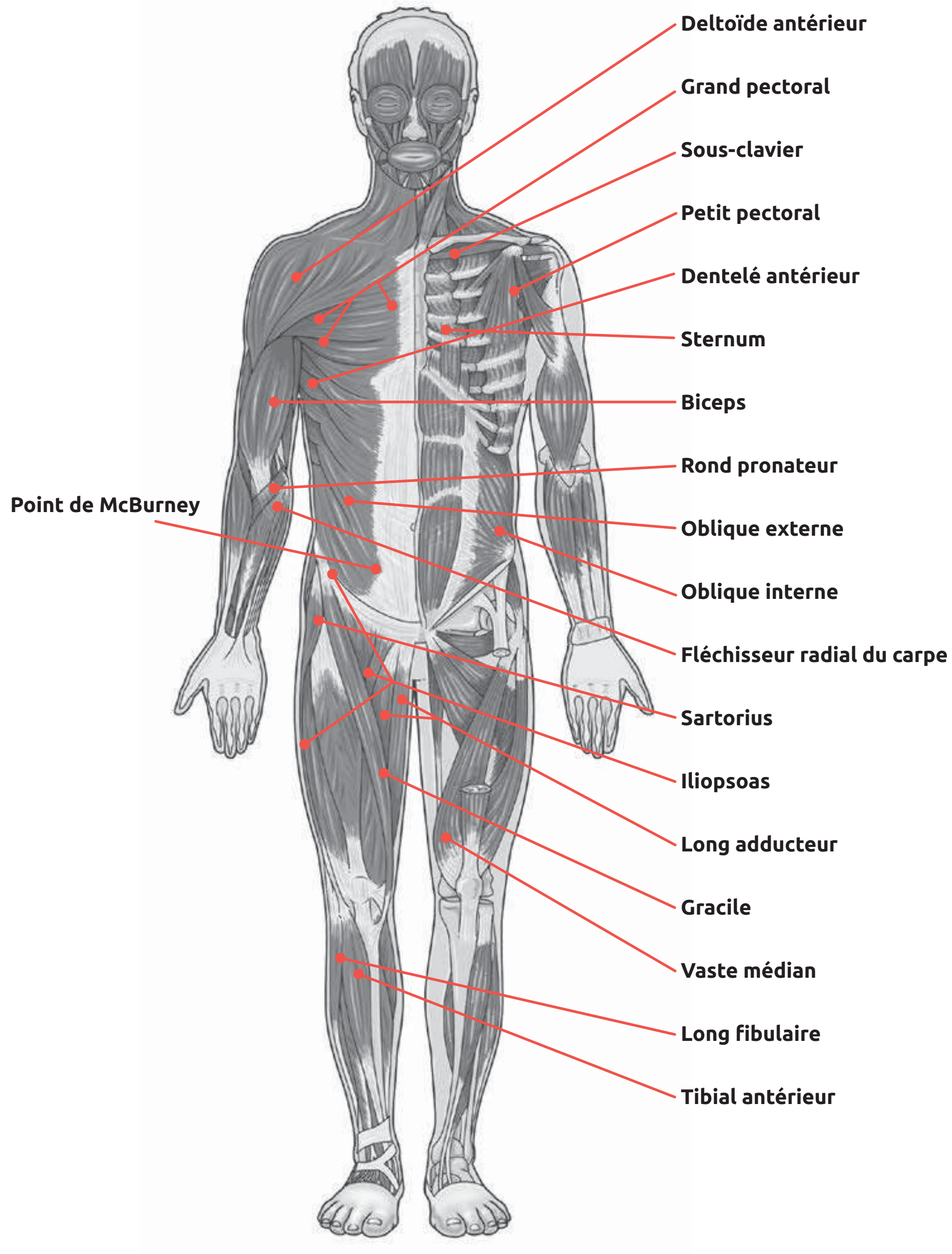
Footballer	Footballer et Baller Block	Progression 1	Amener l'autre bras et relâcher le côté massé
		Progression 2	2 x pivoter
		Progression 3	2 x balle vers l'aisselle
		Répéter la progression 4 fois	
		Tourner l'épaule vers l'avant 4 fois	
		Test : forcer à 2 pour la stabilité des épaules	
		Répéter sur l'autre membre	



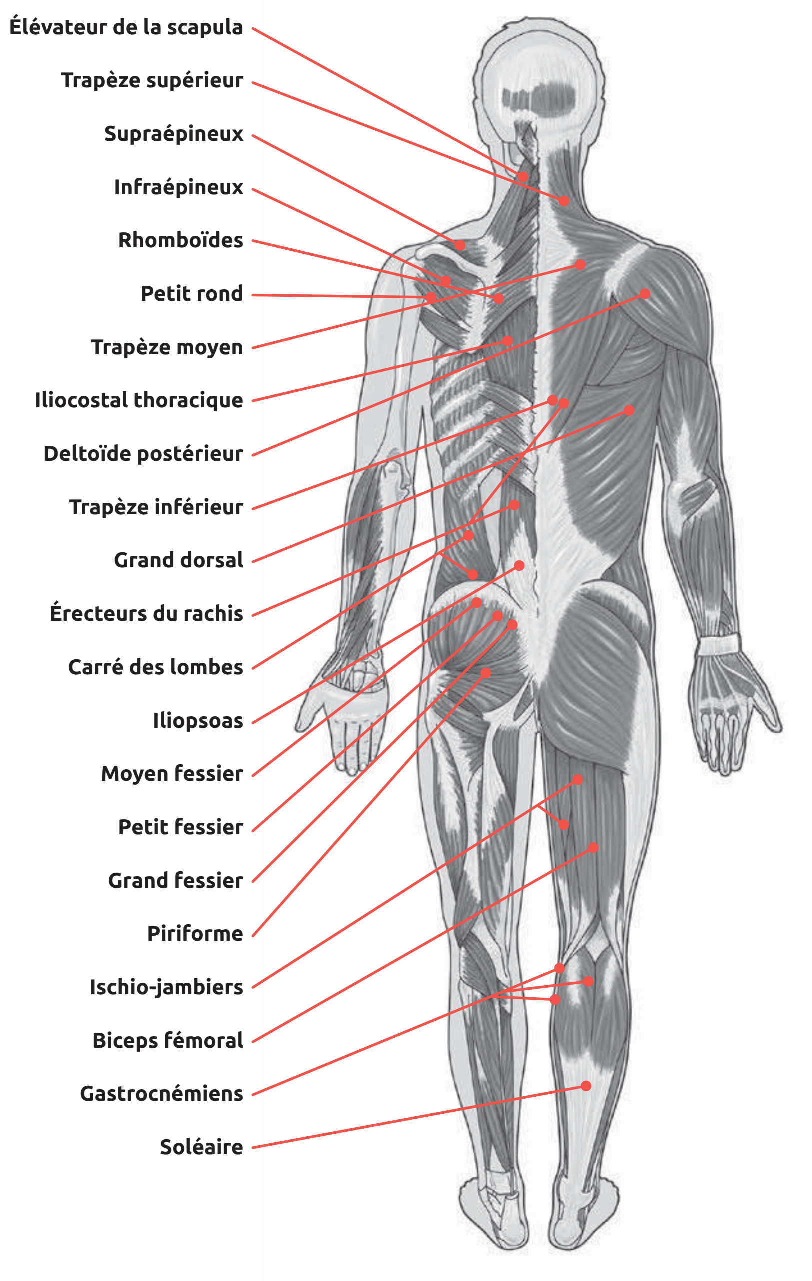
10 • RÉGION DU TRONC, FACE LATÉRO-SUPÉRIEURE
Le grand dorsal

Footballer	Footballer et Baller Block	Progression 1	4 x pivoter
		Progression 2	2 x intérieur
		Progression 3	2 x extérieur
		Répéter la progression 4 fois	
		Tourner l'épaule bras tendu vers l'arrière	
		Test : pour une épaule puis l'autre	
		Répéter sur l'autre côté	

POINTS GÂCHETTE - VUE ANTÉRIEURE



POINTS GÂCHETTE - VUE POSTÉRIEURE



Bibliographie

• 1 • Abedelmalek S, Chtourou H, Aloui A, Aouichaoui C, Souissi N, and Tabka Z. Effect of time of day and partial sleep deprivation on plasma concentrations of IL-6 during a short-term maximal performance. Eur J Appl Physiol 113: 241-248, 2013.

• 2 • Abedelmalek S, Souissi N, Chtourou H, Denguezli M, Aouichaoui C, Ajina M, Aloui A, Dogui M, Haddouk S, and Tabka Z. Effects of partial sleep deprivation on proinflammatory cytokines, growth hormone, and steroid hormone concentrations during repeated brief sprint interval exercise. Chronobiology international 30: 502-509, 2013.

• 3 • Achten J and Jeukendrup AE. Heart Rate Monitoring: Applications and Limitations. Sports Medicine 33: 517-538, 2003.

• 4 • Alvarez DJ and Rockwell PG. Trigger points: diagnosis and management. American family physician 65: 653-660, 2002.

• 5 • Ament W and Verkerke GJ. Exercise and Fatigue. Sports Medicine 39: 389-422 310.2165/00007256-200939050-200900005, 2009.

• 6 • Aranha MF, Alves MC, Berzin F, and Gaviao MB. Efficacy of electroacupuncture for myofascial pain in the upper trapezius muscle: a case series. Rev Bras Fisioter 15: 371-379, 2011.

• 7 • Arazi H, Asadi A, and Hoseini K. Comparison of two different warm-ups (static-stretching and massage): effects on flexibility and explosive power. Acta Kinesiologica 6: 55-59, 2012.

• 8 • Atkinson G and Reilly T. Circadian Variation in Sports Performance. Sports Medicine 21: 292-312, 1996.

• 9 • Aubert AE, Seps B, and Beckers F. Heart Rate Variability in Athletes. Sports Medicine 33: 889-919, 2003.

• 10 • Babault N, Cometti C, Maffiuletti NA, and Deley G. Does electrical stimulation enhance post-exercise performance recovery? Eur J Appl Physiol 111: 2501-2507, 2011.

• 11 • Banfi G, Lombardi G, Colombini A, and Melegati G. Whole-Body Cryotherapy in Athletes. Sports Medicine 40: 509-517 510.2165/11531940-000000000-000000000, 2010.

• 12 • Bangsbo J and Hellsten Y. Muscle blood flow and oxygen uptake in recovery from exercise. Acta Physiol Scand 162: 305-312, 1998.

• 13 • Barnes MJ, Mundel T, and Stannard SR. Acute alcohol consumption aggravates the decline in muscle performance following strenuous eccentric exercise. J Sci Med Sport 13: 189-193, 2010.

• 14 • Barnett A. Using Recovery Modalities between Training Sessions in Elite Athletes: Does it Help? Sports Medicine 36: 781-796, 2006.

• 15 • Baumert M, Brechtel L, Lock J, Hermsdorf M, Wolff R, Baier V, and Voss A. Heart rate variability, blood pressure variability, and baroreflex sensitivity in overtrained athletes. Clin J Sport Med 16: 412-417, 2006.

• 16 • Baumert M, Brechtel L, Lock J, and Voss A. Changes in heart rate variability of athletes during a training camp. Biomedizinische Technik Biomedical engineering 51: 201-204, 2006.

• 17 • Bemben MG and Lamont HS. Creatine supplementation and exercise performance: recent findings. Sports Med 35: 107-125, 2005.

• 18 • Bennett RM and Goldenberg DL. Fibromyalgia, myofascial pain, tender points and trigger points: splitting or lumping? Arthritis research & therapy 13: 117, 2011.

• 19 • Bentley S. Exercise-Induced Muscle Cramp: Proposed Mechanisms and Management. Sports Medicine 21: 409-420, 1996.

• 20 • Berg A, Schaffner D, Pohlmann Y, Baumstark MW, Deibert P, Konig D, and Gollhofer A. A soy-based supplement alters energy metabolism but not the exercise-induced stress response. Exercise immunology review 18: 128-141, 2012.

• 21 • Best TM, Gharaibeh B, and Huard J. Stem cells, angiogenesis and muscle healing: a potential role in massage therapies? Br J Sports Med, 2012.

• 22 • Betts JA and Williams C. Short-Term Recovery from Prolonged Exercise: Exploring the Potential for Protein Ingestion to Accentuate the Benefits of Carbohydrate Supplements. Sports Medicine 40: 941-959 910.2165/11536900-000000000-000000000, 2010.

• 23 • Binnie MJ, Peeling P, Pinnington H, Landers G, and Dawson B. Effect of training surface on acute physiological responses following interval training. The Journal of Strength & Conditioning Research Publish Ahead of Print: 10.1519/JSC.1510b1013e3182651fab, 2012.

• 24 • Binnie MJ, Peeling P, Pinnington H, Landers G, and Dawson B. Part 2: Effect of training surface on acute physiological responses following sport-specific training. The Journal of Strength & Conditioning Research Publish Ahead of Print: 10.1519/JSC.1510b1013e3182651d3182663, 2012.

• 25 • Bishop PA, Jones E, and Woods AK. Recovery from training: a brief review: brief review. J Strength Cond Res 22: 1015-1024, 2008.

• 26 • Borresen J and Lambert MI. Changes in heart rate recovery in response to acute changes in training load. Eur J Appl Physiol 101: 503-511, 2007.

• 27 • Borresen J and Lambert MI. Autonomic Control of Heart Rate during and after Exercise: Measurements and Implications for Monitoring Training Status. Sports Medicine 38: 633-646, 2008.

• 28 • Børsheim E and Bahr R. Effect of Exercise Intensity, Duration and Mode on Post-Exercise Oxygen Consumption. Sports Medicine 33: 1037-1060, 2003.

• 29 • Bosquet L, Merkari S, Arvisais D, and Aubert AE. Is heart rate a convenient tool to monitor over-reaching? A systematic review of the literature. Br J Sports Med 42: 709-714, 2008.

• 30 • Bracken RM, West DJ, Stephens JW, Kilduff LP, Luzio S, and Bain SC. Impact of pre-exercise rapid-acting insulin reductions on ketogenesis following running in Type 1 diabetes. Diabetic medicine : a journal of the British Diabetic Association 28: 218-222, 2011.

• 31 • Brentano MA and Martins Kruel LF. A review on strength exercise-induced muscle damage: applications, adaptation mechanisms and limitations. J Sports Med Phys Fitness 51: 1-10, 2011.

• 32 • Buchheit M. Utilisation de la variabilité de la fréquence cardiaque chez le sportif. Cardio Sport: 29-37, 2006.

• 33 • Burd NA, Andrews RJ, West DW, Little JP, Cochran AJ, Hector AJ, Cashaback JG, Gibala MJ, Potvin JR, Baker SK, and Phillips SM. Muscle time under tension during resistance exercise stimulates differential muscle protein sub-fractional synthetic responses in men. J Physiol 590: 351-362, 2012.

• 34 • Camera DM, West DW, Burd NA, Phillips SM, Garnham AP, Hawley JA, and Coffey VG. Low muscle glycogen concentration does not suppress the anabolic response to resistance exercise. J Appl Physiol 113: 206-214, 2012.

• 35 • Ce E, Limonta E, Maggioni MA, Rampichini S, Veicsteinas A, and Esposito F. Stretching and deep and superficial massage do not influence blood lactate levels after heavy-intensity cycle exercise. J Sports Sci 31: 856-866, 2013.

• 36 • Cheung K, Hume PA, and Maxwell L. Delayed Onset Muscle Soreness: Treatment Strategies and Performance Factors. Sports Medicine 33: 145-164, 2003.

• 37 • Chou LW, Kao MJ, and Lin JG. Probable mechanisms of needling therapies for myofascial pain control. Evidence-based complementary and alternative medicine : eCAM 2012: 705327, 2012.

• 38 • Costello JT, Algar LA, and Donnelly AE. Effects of whole-body cryotherapy (-110 degrees C) on proprioception and indices of muscle damage. Scand J Med Sci Sports 22: 190-198, 2012.

• 39 • Cummings M. Myofascial pain from pectoralis major following trans-axillary surgery. Acupuncture in medicine : journal of the British Medical Acupuncture Society 21: 105-107, 2003.

• 40 • Dattilo M, Antunes HK, Medeiros A, Monico Neto M, Souza HS, Tufik S, and de Mello MT. Sleep and muscle recovery: endocrinological and molecular basis for a new and promising hypothesis. Med Hypotheses 77: 220-222, 2011.

• 41 • de Salles BF, Simao R, Miranda F, Novaes Jda S, Lemos A, and Willardson JM. Rest interval between sets in strength training. Sports Med 39: 765-777, 2009.

• 42 • DOURIS P, MCKENNA R, MADIGAN K, CESARSKI B, COSTIERA R, and LU M. Recovery of Maximal Isometric Grip Strength Following Cold Immersion. The Journal of Strength & Conditioning Research 17: 509-513, 2003.

• 43 • Dugue B, Smolander J, Westerlund T, Oksa J, Nieminen R, Moilanen E, and Mikkelsson M. Acute and long-term effects of winter swimming and whole-body cryotherapy on plasma antioxidative capacity in healthy women. Scandinavian journal of clinical and laboratory investigation 65: 395-402, 2005.

• 44 • Fletcher IM. The Effects of Precompetition Massage on the Kinematic Parameters of 20-m Sprint Performance. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 1179-1183 1110.1519/JSC.1170b1013e3181ceec1170f, 2010.

• 45 • Flores DF, Gentil P, Brown LE, Pinto RS, Carregaro RL, and Bottaro M. Dissociated time course of recovery between genders after resistance exercise. J Strength Cond Res 25: 3039-3044, 2011.

• 46 • Forbes-Robertson S, Dudley E, Vadgama P, Cook C, Drawer S, and Kilduff L. Circadian Disruption and Remedial Interventions: Effects and Interventions for Jet Lag for Athletic Peak Performance. Sports Medicine 42: 185-208 110.2165/11596850-000000000-000000000, 2012.

• 47 • Gaesser GA and Brooks GA. Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review. Med Sci Sports Exerc 16: 29-43, 1984.

• 48 • Gamelin FX, Baquet G, Berthoin S, and Bosquet L. Validity of the polar S810 to measure R-R intervals in children. Int J Sports Med 29: 134-138, 2008.

• 49 • Gamelin FX, Berthoin S, and Bosquet L. Validity of the polar S810 heart rate monitor to measure R-R intervals at rest. Med Sci Sports Exerc 38: 887-893, 2006.

• 50 • Gerwin RD. A review of myofascial pain and fibromyalgia--factors that promote their persistence. Acupuncture in medicine : journal of the British Medical Acupuncture Society 23: 121-134, 2005.

• 51 • Goodman JM, Plyley MJ, Hart LE, Radomski M, and Shephard RJ. Moderate exercise and hemodilution during sleep deprivation. Aviation, space, and environmental medicine 61: 139-144, 1990.

• 52 • Haas C, Best TM, Wang Q, Butterfield TA, and Zhao Y. In vivo passive mechanical properties of skeletal muscle improve with massage-like loading following eccentric exercise. J Biomech 45: 2630-2636, 2012.

• 53 • Haas C, Butterfield TA, Abshire S, Zhao Y, Zhang X, Jarjoura D, and Best TM. Massage Timing Affects Postexercise Muscle Recovery and Inflammation in a Rabbit Model. Med Sci Sports Exerc, 2012.

• 54 • Haas C, Butterfield TA, Zhao Y, Zhang X, Jarjoura D, and Best TM. Dose-dependency of massage-like compressive loading on recovery of active muscle properties following eccentric exercise: rabbit study with clinical relevance. Br J Sports Med 47: 83-88, 2013.

• 55 • Hackney KJ, Cook SB, and Ploutz-Snyder LL. Nutrition and resistance exercise during reconditioning from unloading. Aviation, space, and environmental medicine 82: 805-809, 2011.

• 56 • Halson SL and Jeukendrup AE. Does overtraining exist? An analysis of overreaching and overtraining research. Sports Medicine 34: 967-981, 2004.

• 57 • Hanten WP, Olson SL, Butts NL, and Nowicki AL. Effectiveness of a Home Program of Ischemic Pressure Followed by Sustained Stretch for Treatment of Myofascial Trigger Points. Physical therapy 80: 997-1003, 2000.

• 58 • Hartgens F and Kuipers H. Effects of Androgenic-Anabolic Steroids in Athletes. Sports Medicine 34: 513-554, 2004.

• 59 • Hausswirth C and Le Meur Y. Physiological and Nutritional Aspects of Post-Exercise Recovery: Specific Recommendations for Female Athletes. Sports Medicine 41: 861-882 810.2165/11593180-000000000-000000000, 2011.

• 60 • Hausswirth C, Louis J, Bieuzen F, Pournot H, Fournier J, Filliard JR, and Brisswalter J. Effects of whole-body cryotherapy vs. far-infrared vs. passive modalities on recovery from exercise-induced muscle damage in highly-trained runners. PloS one 6: e27749, 2011.

• 61 • Hélal H. Sport de haut niveau et récupération. Paris: INSEP, 2000.

• 62 • Hemmings B, Smith M, Graydon J, and Dyson R. Effects of massage on physiological restoration, perceived recovery, and repeated sports performance. Br J Sports Med 34: 109-114, 2000.

• 63 • Hilbert JE, Sforzo GA, and Swensen T. The effects of massage on delayed onset muscle soreness. Br J Sports Med 37: 72-75, 2003.

• 64 • Hinds T, McEwan I, Perkes J, Dawson E, Ball D, and George K. Effects of massage on limb and skin blood flow after quadriceps exercise. Med Sci Sports Exerc 36: 1308-1313, 2004.

• 65 • Hoffman JR, Ratamess NA, Tranchina CP, Rashti SL, Kang J, and Faigenbaum AD. Effect of a proprietary protein supplement on recovery indices following resistance exercise in strength/power athletes. Amino acids 38: 771-778, 2010.

• 66 • Hou CR, Tsai LC, Cheng KF, Chung KC, and Hong CZ. Immediate effects of various physical therapeutic modalities on cervical myofascial pain and trigger-point sensitivity. Archives of physical medicine and rehabilitation 83: 1406-1414, 2002.

• 67 • Howatson G, Gaze D, and van Someren KA. The efficacy of ice massage in the treatment of exercise-induced muscle damage. Scand J Med Sci Sports 15: 416-422, 2005.

• 68 • Hsieh YL, Yang SA, Yang CC, and Chou LW. Dry needling at myofascial trigger spots of rabbit skeletal muscles modulates the biochemicals associated with pain, inflammation, and hypoxia. Evidence-based complementary and alternative medicine : eCAM 2012: 342165, 2012.

• 69 • Huang SY, Di Santo M, Wadden KP, Cappa DF, Alkanani T, and Behm DG. Short-Duration Massage at the Hamstrings Musculotendinous Junction Induces Greater Range of Motion. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 1917-1924 1910.1519/JSC.1910b1013e3181e1906e1910c, 2010.

• 70 • Hudson Z. Enhancing recovery and performance in sport. Physical therapy in sport : official journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine 7: 169-170, 2006.

• 71 • Ingram J, Dawson B, Goodman C, Wallman K, and Beilby J. Effect of water immersion methods on post-exercise recovery from simulated team sport exercise. J Sci Med Sport 12: 417-421, 2009.

• 72 • Jamurtas AZ, Theocharis V, Tofas T, Tsiokanos A, Yfanti C, Paschalis V, Koutedakis Y, and Nosaka K. Comparison between leg and arm eccentric exercises of the same relative intensity on indices of muscle damage. Eur J Appl Physiol 95: 179-185, 2005.

• 73 • Jentjens R and Jeukendrup AE. Determinants of Post-Exercise Glycogen Synthesis During Short-Term Recovery. Sports Medicine 33: 117-144, 2003.

• 74 • Jonhagen S, Ackermann P, Eriksson T, Saartok T, and Renstrom PA. Sports massage after eccentric exercise. Am J Sports Med 32: 1499-1503, 2004.

• 75 • Kenttä G and Hassmén P. Prévention du surentraînement. Evaluation et techniques de récupération. Paris: Masson, 2002.

• 76 • Kerasioti E, Stagos D, Jamurtas A, Kiskini A, Koutedakis Y, Goutzourelas N, Pournaras S, Tsatsakis AM, and Kouretas D. Anti-inflammatory effects of a special carbohydrate-whey protein cake after exhaustive cycling in humans. Food and chemical toxicology : an international journal published for the British Industrial Biological Research Association, 2013.

• 77 • Kerksick C, Harvey T, Stout J, Campbell B, Wilborn C, Kreider R, Kalman D, Ziegenfuss T, Lopez H, Landis J, Ivy JL, and Antonio J. International Society of Sports Nutrition position stand: nutrient timing. Journal of the International Society of Sports Nutrition 5: 17, 2008.

• 78 • Kinugasa T and Kilding AE. A Comparison of Post-Match Recovery Strategies in Youth Soccer Players. The Journal of Strength & Conditioning Research 23: 1402-1407 1410.1519/JSC.1400b1013e3181a0226a, 2009.

• 79 • Koopman R, Saris WHM, Wagenmakers AJM, and van Loon LJC. Nutritional Interventions to Promote Post-Exercise Muscle Protein Synthesis. Sports Medicine 37: 895-906, 2007.

• 80 • Koutedakis Y. Seasonal variation in fitness parameters in competitive athletes. Sports Med 19: 373-392, 1995.

• 81 • Lambert M and Borresen J. A Theoretical Basis of Monitoring Fatigue: A Practical Approach for Coaches. International Journal of Sports Science and Coaching 1: 371-388, 2006.

• 82 • Lambert MI and Borresen J. Measuring training load in sports. Int J Sports Physiol Perform 5: 406-411, 2010.

• 83 • Lamberts RP, Maskell S, Borresen J, and Lambert MI. Adapting workload improves the measurement of heart rate recovery. Int J Sports Med 32: 698-702, 2011.

• 84 • Lamberts RP, Swart J, Capostagno B, Noakes TD, and Lambert MI. Heart rate recovery as a guide to monitor fatigue and predict changes in performance parameters. Scand J Med Sci Sports 20: 449-457, 2010.

• 85 • Lehmann M, Foster C, and Keul J. Overtraining in endurance athletes: a brief review. Med Sci Sports Exerc 25: 854-862, 1993.

• 86 • Leivadi S, Hernandez-Reif M, Field T, O'Rourke M, D'Arienzo S, Lewis D, Pino Nd, Schanberg S, and Kuhn C. Massage Therapy and Relaxation Effects on University Dance Students. Journal of Dance Medicine & Science 3: 108-112, 1999.

• 87 • Leproult R, Van Reeth O, Byrne MM, Sturis J, and Van Cauter E. Sleepiness, performance, and neuroendocrine function during sleep deprivation: effects of exposure to bright light or exercise. Journal of biological rhythms 12: 245-258, 1997.

• 88 • Lindgren L, Rundgren S, Winso O, Lehtipalo S, Wiklund U, Karlsson M, Stenlund H, Jacobsson C, and Brulin C. Physiological responses to touch massage in healthy volunteers. Autonomic neuroscience : basic & clinical 158: 105-110, 2010.

• 89 • MacRae BA, Cotter JD, and Laing RM. Compression Garments and Exercise: Garment Considerations, Physiology and Performance. Sports Medicine 41: 815-843 810.2165/11591420-000000000-000000000, 2011.

• 90 • Maughan RJ, Zerguini Y, Chalabi H, and Dvorak J. Achieving optimum sports performance during Ramadan: some practical recommendations. J Sports Sci 30 Suppl 1: S109-117, 2012.

• 91 • McHugh MP, Connolly DA, Eston RG, and Gleim GW. Exercise-induced muscle damage and potential mechanisms for the repeated bout effect. Sports Med 27: 157-170, 1999.

• 92 • McKenna MJ, Heigenhauser GJ, McKelvie RS, MacDougall JD, and Jones NL. Sprint training enhances ionic regulation during intense exercise in men. J Physiol 501 (Pt 3): 687-702, 1997.

• 93 • McMurray RG and Brown CF. The effect of sleep loss on high intensity exercise and recovery. Aviation, space, and environmental medicine 55: 1031-1035, 1984.

• 94 • Meeusen R and Lievens P. The Use of Cryotherapy in Sports Injuries. Sports Medicine 3: 398-414, 1986.

• 95 • Miller E, Mrowicka M, Malinowska K, Zolynski K, and Kedziora J. Effects of the whole-body cryotherapy on a total antioxidative status and activities of some antioxidative enzymes in blood of patients with multiple sclerosis-preliminary study. The journal of medical investigation : JMI 57: 168-173, 2010.

• 96 • Montgomery PG, Pyne DB, Hopkins WG, Dorman JC, Cook K, and Minahan CL. The effect of recovery strategies on physical performance and cumulative fatigue in competitive basketball. J Sports Sci 26: 1135-1145, 2008.

• 97 • Moraska A. Sports massage. A comprehensive review. J Sports Med Phys Fitness 45: 370-380, 2005.

• 98 • Moses J, Lubin A, Naitoh P, and Johnson LC. Exercise and sleep loss: effects on recovery sleep. Psychophysiology 14: 414-416, 1977.

• 99 • Murayama M, Nosaka K, Yoneda T, and Minamitani K. Changes in hardness of the human elbow flexor muscles after eccentric exercise. Eur J Appl Physiol 82: 361-367, 2000.

• 100 • Nedelec M, McCall A, Carling C, Legall F, Berthoin S, and Dupont G. Recovery in soccer : part ii-recovery strategies. Sports Med 43: 9-22, 2013.

• 101 • Nédélec M, McCall A, Carling C, Legall F, Berthoin S, and Dupont G. Recovery in Soccer: Part I – Post-Match Fatigue and Time Course of Recovery. Sports Medicine 42: 997-1015 1010.2165/11635270-000000000-000000000, 2012.

• 102 • Neric FB, Beam WC, Brown LE, and Wiersma LD. Comparison of swim recovery and muscle stimulation on lactate removal after sprint swimming. J Strength Cond Res 23: 2560-2567, 2009.

• 103 • Nicol C, Avela J, and Komi PV. The Stretch-Shortening Cycle: A Model to Study Naturally Occurring Neuromuscular Fatigue. Sports Medicine 36: 977-999, 2006.

• 104 • Nieman DC and Nehlsen-Cannarella SL. The Effects of Acute and Chronic Exercise on Immunoglobulins. Sports Medicine 11: 183-201, 1991.

• 105 • Nomikos NN, Nomikos GN, and Kores DS. The use of deep friction massage with olive oil as a means of prevention and treatment of sports injuries in ancient times. Arch Med Sci 6: 642-645, 2010.

• 106 • Nosaka K and Newton M. Is recovery from muscle damage retarded by a subsequent bout of eccentric exercise inducing larger decreases in force? J Sci Med Sport 5: 204-218, 2002.

• 107 • Nosaka K, Sacco P, and Mawatari K. Effects of amino acid supplementation on muscle soreness and damage. Int J Sport Nutr Exerc Metab 16: 620-635, 2006.

• 108 • Nunan D, Howatson G, and van Someren KA. Exercise-Induced Muscle Damage Is Not Attenuated by [beta]-Hydroxy-[beta]-Methylbutyrate and [alpha]-Ketoisocaproic Acid Supplementation. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 531-537 510.1519/JSC.1510b1013e3181c1514d1370, 2010.

• 109 • Nunan D, Howatson G, and van Someren KA. Exercise-induced muscle damage is not attenuated by beta-hydroxy-beta-methylbutyrate and alpha-ketoisocaproic acid supplementation. J Strength Cond Res 24: 531-537, 2010.

• 110 • Ohuchi H, Suzuki H, Yasuda K, Arakaki Y, Echigo S, and Kamiya T. Heart rate recovery after exercise and cardiac autonomic nervous activity in children. Pediatr Res 47: 329-335, 2000.

• 111 • Paddon-Jones D, Muthalib M, and Jenkins D. The effects of a repeated bout of eccentric exercise on indices of muscle damage and delayed onset muscle soreness. J Sci Med Sport 3: 35-43, 2000.

• 112 • Pascoe DD and Gladden LB. Muscle Glycogen Resynthesis after Short Term, High Intensity Exercise and Resistance Exercise. Sports Medicine 21: 98-118, 1996.

• 113 • Peiffer JJ, Abbiss CR, Nosaka K, Peake JM, and Laursen PB. Effect of cold water immersion after exercise in the heat on muscle function, body temperatures, and vessel diameter. J Sci Med Sport 12: 91-96, 2009.

• 114 • Peluaga M, Rubley MD, Holcomb WR, and Tandy RD. The Effect Of Cryotherapy On Eccentric Peak Torque Recovery After Intense Eccentric Exercise. The Journal of Strength & Conditioning Research 24: 1 10.1097/1001.JSC.0000367190.0000332515.0000367146, 2010.

• 115 • Perini R and Veicsteinas A. Heart rate variability and autonomic activity at rest and during exercise in various physiological conditions. Eur J Appl Physiol 90: 317-325, 2003.

• 116 • Pichot V, Busso T, Roche F, Garet M, Costes F, Duverney D, Lacour JR, and Barthelemy JC. Autonomic adaptations to intensive and overload training periods: a laboratory study. Med Sci Sports Exerc 34: 1660-1666, 2002.

• 117 • Poppendieck W, Faude O, Wegmann M, and Meyer T. Cooling and Performance Recovery of Trained Athletes - a Meta-Analytical Review. Int J Sports Physiol Perform, 2013.

• 118 • Portier H, Louisy F, Laude D, Berthelot M, and Guezennec CY. Intense endurance training on heart rate and blood pressure variability in runners. Med Sci Sports Exerc 33: 1120-1125, 2001.

• 119 • Pournot H, Bieuzen F, Louis J, Mounier R, Fillard JR, Barbiche E, and Hausswirth C. Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. PloS one 6: e22748, 2011.

• 120 • Racinais S. Different effects of heat exposure upon exercise performance in the morning and afternoon. Scand J Med Sci Sports 20 Suppl 3: 80-89, 2010.

• 121 • Reilly T and Ekblom B. The use of recovery methods post-exercise. J Sports Sci 23: 619-627, 2005.

• 122 • Robertson A, Watt JM, and Galloway SD. Effects of leg massage on recovery from high intensity cycling exercise. Br J Sports Med 38: 173-176, 2004.

• 123 • Robey E, Dawson B, Goodman C, and Beilby J. Effect of postexercise recovery procedures following strenuous stair-climb running. Res Sports Med 17: 245-259, 2009.

• 124 • Rodenburg JB, Steenbeek D, Schiereck P, and Bar PR. Warm-up, stretching and massage diminish harmful effects of eccentric exercise. Int J Sports Med 15: 414-419, 1994.

• 125 • Rodriguez NR, Di Marco NM, and Langley S. American College of Sports Medicine position stand. Nutrition and athletic performance. Med Sci Sports Exerc 41: 709-731, 2009.

• 126 • Sadowsky CL and McDonald JW. Activity-based restorative therapies: concepts and applications in spinal cord injury-related neurorehabilitation. Developmental disabilities research reviews 15: 112-116, 2009.

• 127 • Samuels C. Sleep, recovery, and performance: the new frontier in high-performance athletics. Neurologic clinics 26: 169-180; ix-x, 2008.

• 128 • Sartor F, Vailati E, Valsecchi V, Vailati F, and La Torre A. Heart rate variability reflects training load and psychophysiological status in young elite gymnasts. The Journal of Strength & Conditioning Research Publish Ahead of Print: 10.1519/JSC.1510b1013e31828783cc, 2013.

• 129 • Skootsky SA, Jaeger B, and Oye RK. Prevalence of myofascial pain in general internal medicine practice. The Western journal of medicine 151: 157-160, 1989.

• 130 • Tiidus PM. Manual massage and recovery of muscle function following exercise: a literature review. J Orthop Sports Phys Ther 25: 107-112, 1997.

• 131 • Tiidus PM. Massage and ultrasound as therapeutic modalities in exercise-induced muscle damage. Can J Appl Physiol 24: 267-278, 1999.

• 132 • Tiidus PM and Shoemaker JK. Effleurage massage, muscle blood flow and long-term post-exercise strength recovery. Int J Sports Med 16: 478-483, 1995.

• 133 • Tomlin DL and Wenger HA. The relationship between aerobic fitness and recovery from high intensity intermittent exercise. Sports Med 31: 1-11, 2001.

• 134 • Tomlin DL and Wenger HA. The Relationship Between Aerobic Fitness and Recovery from High Intensity Intermittent Exercise. Sports Medicine 31: 1-11, 2001.

• 135 • Vaile J, Halson S, Gill N, and Dawson B. Effect of hydrotherapy on the signs and symptoms of delayed onset muscle soreness. Eur J Appl Physiol 102: 447-455, 2008.

• 136 • van Loon LJ and Gibala MJ. Dietary protein to support muscle hypertrophy. Nestle Nutrition Institute workshop series 69: 79-89; discussion 89-95, 2011.

• 137 • VanHelder T, Symons JD, and Radomski MW. Effects of sleep deprivation and exercise on glucose tolerance. Aviation, space, and environmental medicine 64: 487-492, 1993.

• 138 • Walsh NP, Gleeson M, Pyne DB, Nieman DC, Dhabhar FS, Shephard RJ, Oliver SJ, Bermon S, and Kajeniene A. Position statement. Part two: Maintaining immune health. Exercise immunology review 17: 64-103, 2011.

• 139 • Walton P and Rhodes EC. Glycaemic Index and Optimal Performance. Sports Medicine 23: 164-172, 1997.

• 140 • Warren GL, Ingalls CP, Lowe DA, and Armstrong RB. Excitation-Contraction Uncoupling: Major Role in Contraction-Induced Muscle Injury. Exercise and sport sciences reviews 29: 82-87, 2001.

• 141 • Weerapong P, Hume PA, and Kolt GS. The Mechanisms of Massage and Effects on Performance, Muscle Recovery and Injury Prevention. Sports Medicine 35: 235-256, 2005.

• 142 • Weinberg RS, Jackson AJ, and Kolodny K. The relationship of massage and exercise to mood enhancement. The Sport Psychologist 2: 202-211, 1988.

• 143 • Wilkinson SB, Kim PL, Armstrong D, and Phillips SM. Addition of glutamine to essential amino acids and carbohydrate does not enhance anabolism in young human males following exercise. Appl Physiol Nutr Metab 31: 518-529, 2006.

• 144 • Wiltshire EV, Poitras V, Pak M, Hong T, Rayner J, and Tschakovsky ME. Massage impairs postexercise muscle blood flow and "lactic acid" removal. Med Sci Sports Exerc 42: 1062-1071, 2010.

• 145 • Wojtecka-Lukasik E, Ksiezopolska-Orlowska K, Gaszewska E, Krasowicz-Towalska O, Rzodkiewicz P, Maslinska D, Szukiewicz D, and Maslinski S. Cryotherapy decreases histamine levels in the blood of patients with rheumatoid arthritis. Inflammation research : official journal of the European Histamine Research Society [et al] 59 Suppl 2: S253-255, 2010.

• 146 • Yamauchi T. Whole Body Cryo-Therapy is Method of extreme cold -175°C Treatment initially used for Rheumatoid Arthritis. Z Phys Med Baln Med Klim 15: 311, 1989.

• 147 • Yap EC. Myofascial pain--an overview. Annals of the Academy of Medicine, Singapore 36: 43-48, 2007.

• 148 • Zeitlin D, Keller SE, Shiflett SC, Schleifer SJ, and Bartlett JA. Immunological Effects of Massage Therapy During Academic Stress. Psychosomatic medicine 62: 83-84, 2000.

• 149 • Zhang ZJ, Wang XM, and McAlonan GM. Neural acupuncture unit: a new concept for interpreting effects and mechanisms of acupuncture. Evidence-based complementary and alternative medicine: eCAM 2012: 429412, 2012.

• 150 • Crane JD, Ogborn DI, Cupido C, Melov S, Hubbard A, Bourgeois JM and Tarnopolsky MA. Massage Therapy Attenuates Inflammatory Signaling After Exercise-Induced Muscle Damage. Sci Transl Med, 4(119):119-ra13, 2012.

• 151 • Sharkey J. The Concise Book of Neuromuscular Therapy. North Atlantic Books, 2e Ed., 2008, 240 p.

• 152 • MacDonald, GZ, Penney, MDH, Mullaley, ME, Cuconato, AL, Drake, CDJ, Behm, DG, and Button, DC. An acute bout of selfmyofascial release increases range of motion without a subsequent decrease in muscle activation or force. J Strength Cond Res27(3): 812–821, 2013.

Hommage
à la préparation
physique
et aux hommes
d'exception

Hommage à ceux qui nous motivent

Cet ouvrage est l'aboutissement de plusieurs années d'un travail de passionné avec mes entraînés (de tous niveaux), de recherches constantes (formations suivies, livres, revues scientifiques, échanges avec des collègues...) et d'enseignements dans diverses formations que j'ai encadrées (niveau BAC à BAC +5). C'est le fruit d'une aventure humaine avec toutes ses infinies richesses. Les premières rencontres sont dans votre carrière de sportif, l'entraîneur est votre premier modèle. Vos partenaires d'entraînements sont à la fois amis et concurrents, expérience qui peut être troublante. Un sport de combat a une particularité : vous allez engager un combat physique avec une personne que vous appréciez.

Une aventure humaine avec les formateurs que vous rencontrerez, certains marqueront à vie vos carrières. Lors d'une formation que je considère comme la plus mauvaise que j'ai pu effectuer, j'ai eu la chance de me déplacer à Dijon lors du colloque de Gilles Cometti en 1999 sur la préparation physique. Ce jour-là, j'ai réalisé qu'il existait des gens "stratosphériques" (comme il aimait le dire). Quelle leçon pour un étudiant et quelle motivation pour approfondir son domaine. Il a su me montrer des directions que je ne connaissais pas. Par la suite, j'ai cherché à rencontrer les meilleurs. Je crois que j'ai rencontré tous les noms connus dans le domaine (Georges Cazorla, Jean-René Lacour, Jacques Duchateau, Christian Miller, Jean-Pierre Egger... un nombre incroyablement élevé). J'ai suivi des formations dans les facultés de Dijon, Strasbourg, Bordeaux (Talence), Rouen, Caen, Paris (Pitié Salpêtrière, Paris XIII, René Descartes, Paris XI,...), l'INSEP. J'ai cherché à m'enrichir dans plusieurs domaines, rencontrer un maximum de monde. J'avais assez perdu de temps à une époque, je devais en gagner. Quantité et qualité étaient donc possibles.

La première révolution fut Gilles Cometti (l'anticonformiste), la seconde Georges Cazorla (le pédagogue), la troisième fut Michel Dufour (le fouineur). Michel est un monstre de connaissances capable de prendre du recul et d'exposer son point de vue sans apporter de certitudes, une manière élégante de démontrer la réalité complexe. Michel Pradet disait : "Il n'y a de certitudes que sur un point, c'est que des certitudes, il n'y en a point". Moi-même, j'en suis "sûr" ! À tous ces formateurs, je dois ma détermination à rechercher de l'information, à m'améliorer sans cesse ; de limite, il n'existe que sa volonté.

Hommage à l'inéluctable rencontre

J'ai cette chance d'avoir vu l'évolution de l'informatique, de l'Amstrad® 6128 au premier PC, les débuts d'Internet grand public. Aujourd'hui, il est déconcertant de trouver de l'information sur le web. Comment faire le tri ? Cela s'apprend. Mais revenons plus de 14 ans en arrière,

peu de sites francophones offraient de l'information de qualité en sciences du sport. J'avais repéré un site (en particulier Sciensport©) dont la bibliographie était riche ; il m'inspirait confiance. Je décidais de rencontrer son auteur pour quelques questions et me faire une idée du personnage. Une année plus tard, Stéphane Descours (actuellement secrétaire général du syndicat des préparateurs physiques – APS2PF) voulut construire une équipe pédagogique afin d'offrir des formations de qualité. Je rencontrais à nouveau l'auteur de ce site. De toutes ces péripéties est née notre école habilitée par le MJS, Eficiencia (www.eficiencia.pro) qui prépare aux diplômes d'État et autres formations.

Merci à toi Pascal Prévost, de ta détermination à l'efficience, bien que nous ayons des caractères différents, bien des points communs nous unissent dans nos aventures. Ton site a permis de faire émerger un autre site de formation de e-learning (www.conditioning.fr) et nos efforts conjugués donnent naissance à des projets difficiles mais ambitieux.

L'intelligence du sportif de haut niveau

Je souhaite matérialiser une réalité trop souvent déformée par commodité au mieux, par jalousie ou par bêtise au pire. Lors d'une interview à la télévision, on se plaît à passer en boucle les commentaires de certains footballeurs (ou autres sportifs). Mieux, on aime les caricaturer. Ce qui n'est sans doute pas rentré dans l'immense cerveau de ces médisants, c'est que ces talentueux personnages ont été sélectionnés parfois très tôt, que la scolarité a été évincée au profit d'une probable performance. Effectivement, l'enchaînement du sujet-verbe-complément est parfois à la limite de l'acceptable, mais cela ne reste qu'une des facettes de l'individu.

Je propose à tous ces gens si brillants d'exceller dans la pratique corporelle de nos sportifs. Pas de mouvement sans cerveau. L'intelligence motrice existe ! Qu'un grand critique ou analyste sportif aille sur le terrain, se retrouve avec 3 défenseurs face à lui en cumulant un déséquilibre et arrive à tromper un gardien en marquant le but.

Certains ont un talent pour la peinture, la musique, l'écriture ; seule la pratique sportive n'est pas estimée à sa juste valeur. Il fallait écrire, même rapidement, cette réalité.

Hommage aux idiots, ils nous motivent

Bien qu'il existe des gens formidables, parfois le monde du sport est déconcertant de stupidité. Un ouvrage comme celui-ci entretiendra le débat des blouses blanches versus les hommes de terrain. Comme si il existait une dualité incompatible. Lorsque vous n'avez aucun

diplôme, vous êtes un homme de terrain, si vous avez l'audace d'entreprendre des études universitaires, que vous cherchez à vous améliorer, vous dérangez. Vous vous transformez en ce monstre éloigné de la pratique sportive, ignorant de l'efficace car toujours le nez dans les livres.

Un comportement inintelligent est bien souvent visible de tous et parfois admiré…

Didier REISS

Hommage aux hommes de l'ombre : mes mentors

C'était début des années 80

Dès mes premières années de formation d'entraîneur en gymnastique artistique, j'ai compris que pour m'améliorer dans ma discipline, l'essentiel n'était pas forcément accessible via la pratique de terrain. Il faut parfois sortir des sentiers battus pour découvrir de précieuses informations qui nous font voir les choses différemment, donnant une vision plus juste de la réalité telle qu'elle se présente à nous, dans toute sa complexité.

J'ai donc commencé à compléter mes stages par la lecture d'ouvrages aussi variés qu'originaux, et à me rendre compte des décalages entre ce qu'on m'enseignait sur le terrain et ce que démontraient certains écrits en sciences appliquées au sport et à l'exercice physique. Le Macroscope de Joël de Rosnay a été longtemps mon livre de chevet. Ma première source d'inspiration pour changer mes méthodes… il ne l'a jamais su !

Je commençais alors à faire mes premières expériences sur le terrain avec mes gymnastes dans mon club de La Rochelle, et sans le savoir, m'engageais dans une voie qui allait changer définitivement mon point de vue sur la performance sportive en acceptant la proposition de faire des formations au sein du comité régional, et pousser plus loin l'approfondissement des contenus grâce à l'appui et la confiance de Pascal Potrick (CTR). Premier problème : savoir de quoi on parle avant de se lancer dans des explications sur le fonctionnement du corps humain.

C'était début des années 90

Partir à la découverte de la complexité de notre corps en mouvement a fait que mon parcours fut quelque peu atypique. Des débuts orientés logiquement vers les sciences biologiques appliquées au sport m'ont fait rencontrer MM. Jean-Paul Delage (spécialiste du tissu musculaire) et Georges Cazorla (spécialiste de bioénergétique et d'évaluation physiologique) à la faculté des sports de Bordeaux II (Talence).

Ils ont guidé mes premiers pas dans la construction des fondations de ce qui émergeait à l'époque, une interpénétration du laboratoire et du terrain. Lors de ma Maîtrise puis de mon D.E.S.S. (aujourd'hui l'équivalent d'un Master 2, le premier du genre en France à aborder la préparation physique de façon scientifique), ils ont su aiguiser mon esprit critique, me montrer que les "évidences de terrain" sont loin de l'être, surtout quand on les confronte à la réalité expérimentale. Mais aussi que le terrain, par l'observation des athlètes en action, était une source de questionnement infinie pour qui souhaite entretenir ce va-et-vient et mieux comprendre les leviers de la performance via l'individualisation de l'entraînement.

C'était début des années 2000

Pourtant, je restais sur ma faim. Il me manquait quelque chose pour aller plus loin dans cette quête de l'individualisation. Vint alors la période orientée vers la biomécanique et les neurosciences avec la rencontre de deux éminents spécialistes dans leur domaine respectif : MM. Simon Bouisset et Alain Berthoz. Tous deux ont fait un pari sur l'avenir : le premier en m'acceptant en D.E.A. sur Paris-Sud Orsay alors que j'avais dépassé la trentaine, le second en m'accueillant dans son prestigieux laboratoire au sein du Collège de France, où j'allais affûter mes armes de chercheur avec des moyens que beaucoup de collègues m'ont envié, que ce soit au niveau environnement humain et matériel ou rencontres et échanges internationaux. Les années passées à leurs côtés ont conforté mon choix de la première heure par la découverte de pans entiers des sciences du mouvement inexploités par les entraîneurs et préparateurs physiques dont je fais partie aujourd'hui. Ce fut une période où tout a rapidement basculé, notamment par mon investissement dans de nouveaux champs scientifiques devenus à la "mode".

La boucle était bouclée : j'avais balayé presque tous les aspects de la performance en 20 ans, y compris ceux en lien avec la nutrition en obtenant une certification aux États-Unis sans imaginer l'essor que cela prendrait aujourd'hui. Surtout, je pouvais accéder à une vision beaucoup plus globale que celle de mes débuts d'entraîneur. Qui n'aimerait pas revivre ses 20 ans avec l'expérience de ses quasi 40 ans à l'époque ?!

Je ne remercierai jamais assez ces 4 éminents chercheurs pour leur générosité, leur patience et leur talent pour expliquer et m'aider dans l'exploration de domaines aussi complexes que divers.

Hommage aux précurseurs

Bon nombre d'auteurs, qui n'ont pas de lien direct avec le sport, ont été essentiels à ma construction en tant qu'entraîneur, préparateur physique, formateur et chercheur. Leur regard, leurs idées, leur façon d'appréhender l'Homme et sa complexité ont été une source d'inspiration et de motivation pour aller toujours plus loin dans ce qui allait constituer un modèle toujours plus valide du corps en mouvement, sur lequel reposeraient les processus au cœur. Le premier est Joël de Rosnay comme évoqué plus haut... mais pas que !

J'avais du mal avec la philosophie au lycée. Pourtant, c'est par l'un d'eux que j'ai eu les premiers électrochocs qui ont changé ma conception de la préparation physique. Pensez simplement aux écrits du philosophe Bain : "L'action est une propriété plus intime et inséparable de notre constitution comme n'importe laquelle de nos sensations, et entre en fait en tant que composante des sens de chacun. [...] L'effort volontaire est quasi similaire à une tâche de destruction, d'invention, de choix, de rejet (...) ; la sensation que possède notre esprit du but à atteindre, est le critère avec lequel on évalue" (Bain, 1855).

De là l'idée proposée par Alain Berthoz et d'autres comme Rodolfo Llinás : "Nous ne bougeons pas parce que nous pensons mais nous pensons parce que nous bougeons !". Le sens du corps en mouvement est ce qui alimente notre intelligence. Voilà une toute autre vision du sportif, bien loin de la dichotomie imposée par Descartes (largement remise en cause dans un célèbre ouvrage de Antonio R. Damasio). Les travaux les plus récents démontrent que le corps est de plus en plus considéré comme essentiel au développement de notre cerveau et que le cerveau aide aussi au développement de notre corps dans sa course à l'adaptation. C'est ce que Daniel Wolpert présente avec beaucoup d'humour dans une vidéo disponible sur le site TED.

"L'intelligence du corps, ou intelligence motrice, est la première intelligence à s'établir. Elle a permis aux autres d'émerger avec beaucoup plus d'assurance !". Je pourrais faire mienne cette phrase, mais elle est de Bertrand Théraulaz (Swiss Olympic, Macolin), sur le créateur d'une typologie des motricités qu'il a développée avec son complice de toujours, Ralf Hippolyte. Ce sont ma thèse (mise en ligne) et l'ouvrage du Pr Alain Berthoz qui nous ont fait nous rencontrer, échanger et partager de longues heures de discussion (ça continue toujours). C'est via ce genre de pistes que nous pourrons trouver les solutions les plus prometteuses vers le

chemin d'une individualisation telle que je l'ai imaginée il y a plus de 20 ans... sans pouvoir l'atteindre. Mais je m'en rapproche ! À chacune de mes interventions sur Macolin (l'INSEP suisse), je prends toujours beaucoup de plaisir à échanger sur les implications d'une telle typologie sur nos métiers d'entraîneur et de préparateur physique, voire de *personal trainer*. Nous avons de nombreux points communs ou visions communes concernant l'importance des interactions entre intelligence du corps, sport et performance ; certains à l'origine du lancement de travaux scientifiques pour valider des aspects de cette méthodologie que nous espérons fructueux.

Tout cela peut sembler bien loin du terrain et pourtant ce sont les échanges avec toutes ces personnes qui m'ont permis d'enrichir et d'aborder d'une toute autre façon ce qui est depuis longtemps mon cheval de bataille : confronter sans cesse les faits (pratique) aux dernières avancées scientifiques (modèles théoriques), proposer aux sportifs que j'accompagne des solutions en adéquation avec leur potentiel, leur façon d'être, de bouger, mais ne surtout pas leur imposer un modèle de mouvement qui serait considéré comme LE moule dans lequel les faire entrer à tout prix. Comme j'aime à le dire souvent, le respect de l'intégrité physique, neurophysiologique et cognitive de l'athlète doit être au cœur de nos propositions d'accompagnement. C'est en premier à nous de nous adapter à eux et non l'inverse.

Hommage aux rencontres du 3e type

Une dernière chose et non des moindres. Mes années passées à l'université de Paris XII-Créteil et au Collège de France m'ont fait rencontrer nombre d'étudiants, chercheurs, ingénieurs, techniciens...

En 2002, l'un d'eux m'a contacté via mon site, Sciensport, disponible en intranet en 1998 puis sur la toile en 1999, avec pour ambition de mettre à disposition mes cours aux étudiants pour faire économiser des kilos de rames de papier s'il avait fallu les imprimer (plutôt avant-gardiste en France à l'époque). Ce jeune homme souhaitait passer un diplôme de préparation physique et ne savait pas vers lequel s'orienter. Après une visite sur mon site, il lui avait semblé que je pourrais l'aider dans cette tâche. L'offre était un peu plus étoffée qu'à mon époque avec quatre pôles d'enseignement : Bordeaux, Lyon-Saint-Étienne, Dijon, Lille. Ses questions aussi pertinentes qu'insolentes m'avaient marqué. "Les jeunes ça ose tout", pensais-je. Je me revoyais 15 ans en arrière face à mes propres enseignants à Bordeaux, avec mes questions qui les énervaient quelque peu (un peu comme un enfant de trois ans avec ses innombrables questions – période du "pourquoi ci... pourquoi ça...").

Le clonage humain n'est toujours pas au point, mais nous possédons tous les deux le fameux Astrand® ! Second point commun entre cet étudiant et moi. En fait, il y en avait bien d'autres.

Je me trouvais face à une personne aussi passionnée que moi, qui cherchait aussi à comprendre pourquoi les choses marchent ou ne marchent pas en préparation physique et en entraînement, comment les améliorer pour être efficient ("travailler moins pour gagner plus" en quelque sorte).

Ainsi, Didier Reiss est devenu au fil du temps quasiment un alter ego. Outre les relations d'amitié que nous avons nouées, nous avons consacré et continuons à consacrer de nombreuses heures à challenger mutuellement nos connaissances, à évaluer et confronter nos méthodes de travail. Dans un esprit de compétition qui nous sied bien, nous cherchons la perle rare qui nous amènera à innover encore et toujours dans nos méthodes d'entraînement, à mieux cerner les mécanismes intimes de notre corps soumis à un stress. Tout cela aboutit à bousculer les concepts établis, à ne pas considérer comme acquises les méthodes d'entraînement pratiquées par le plus grand nombre, chose qui était déjà la marque de fabrique de Sciensport© à sa création mais que je partage volontiers avec lui tellement le plaisir est grand.

Je ne te remercierai jamais assez de m'avoir un peu forcé la main pour nous lancer dans la rédaction de cet ouvrage. Sachant ce que cela représentait en termes d'énergie et de temps, j'ai reculé encore et encore ce moment. Cela faisait près de 10 ans que beaucoup d'étudiants, de stagiaires, de visiteurs de mon site ou d'amis me le demandaient. Avec le recul, je ne suis pas mécontent d'avoir attendu pour faire, à quatre mains, ce gros travail de mise à plat de nos connaissances scientifiques et leurs implications pratiques dans le domaine de la préparation physique. C'est une belle aventure. Autre point commun : nous sommes tous les deux pianistes... de quoi faciliter cette coordination tout en laissant s'exprimer le talent de chacun. À quand le prochain ?

Pascal PRÉVOST